



André Paulino Reis

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Caracterização do processo de furação de ligas de NiTi com memória de forma

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Doutora Carla Maria Moreira Machado, Professora
Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade
Nova de Lisboa

Co-Orientador: Doutor João Pedro de Sousa Oliveira,
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de
Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos
Arguente: Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira
Vogal: Doutora Carla Maria Moreira Machado



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2016

Caracterização do processo de furação de ligas de NiTi com memória de forma

Copyright © 2016 André Paulino Reis, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha Família

Agradecimentos

Primeiramente, quero agradecer a todos que me acompanharam ao longo da minha formação académica.

Gostaria também de agradecer aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho o meu muito obrigado, em especial:

À minha orientadora, Professora Carla Machado, pelo acompanhamento, disponibilidade e todo o apoio dado ao longo desta dissertação e também pela partilha de conhecimentos e experiência que foram muito enriquecedores para mim.

Ao meu co-orientador, João Pedro Oliveira, pelo conhecimento partilhado, pela realização dos ensaios por DRX e revisão profunda da dissertação.

Ao Professor Braz Fernandes pelo fornecimento do material para a realização do estudo, pelo conhecimento partilhado ao longo do desenvolvimento deste trabalho e discussão dos resultados obtidos.

À Patrícia Rodrigues pela disponibilidade demonstrada, ajuda na realização dos ensaios de DSC e na discussão de resultados obtidos.

À empresa MCG, em especial ao Eng.º Armando Bastos, nos corte dos provetes.

À empresa GALP, em especial ao Eng.º Paulo Ferreira, na disponibilização dos óleos de corte.

Ao Sr. António Campos e Sr. Paulo Magalhães, pela ajuda e partilha de conhecimentos técnicos ao longo da realização do trabalho experimental.

Aos meus Amigos e Colegas, pelo companheirismo e apoio no decorrer da dissertação, em especial ao Valdemar Duarte que foi um Amigo que esteve sempre presente.

Aos meus Pais, Irmã e Namorada que me apoiaram e me encorajaram em todos os momentos da minha vida, pessoal e académica.

As ligas com memória de forma (SMAs), especialmente a liga de Níquel e Titânio (NiTi) presente na maioria dos produtos dos mercados, em sectores como a indústria automóvel, aeronáutica e biomédica, têm despertado interesse na comunidade científica devido às suas propriedades. Os produtos de alta precisão para aplicações especializadas necessitam de processos de maquinagem para obtenção de uma dada forma final desejada. Contudo, as propriedades das ligas de memória de forma dificultam a sua maquinagem, sendo estes materiais conhecidos por possuírem uma reduzida maquinabilidade.

O propósito desta dissertação é a caracterização do processo de furação da liga NiTi. Para tal, o estudo foi realizado em duas ligas de NiTi (com diferentes percentagens atómicas de Níquel), utilizando ferramentas de corte HSS-E e HM e em três diferentes condições de maquinagem, nomeadamente a seco, emulsão e criogenia. De modo a compreender quais as condições que influenciavam a furação da liga, utilizou-se a técnica de Planeamento de Experiências (DoE), que permite reduzir o número de experiências mantendo a sua eficiência.

Com o resultado dos ensaios realizados foi possível, numa primeira instância, comprovar a dificuldade de maquinar a liga com memória de forma com ferramentas de aço rápido. Verificou-se que a ferramenta de corte de metal duro apresentou bom desempenho na furação nas condições de maquinagem realizadas. Observou-se ainda que utilizando criogenia se obtiveram melhores resultados na furação deste tipo de ligas, o que pode confirmar a convicção inicial de que nestas condições se melhoraria o processo de furação. No domínio das variáveis consideradas neste trabalho verificou-se que a combinação de parâmetros de corte que conduz a melhores resultados na furação de ligas de NiTi corresponde a uma velocidade de corte de 80 m/min e um avanço de 0.08 mm/rot. A liga NiTi-3 (51.0 at. % Ni) que apresentou melhores resultados foi a de maior percentagem de Níquel. A caracterização do material, através das aparas, demonstrou que o material sofreu alterações estruturais o que confirma a influência da força axial e aumento da temperatura na qualidade dos furos produzidos.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma, NiTi, Furação, DoE, Criogenia, DRX

Shape memory alloy (SMAs) have raised interest in the scientific community because of its properties, especially the nickel and titanium intermetallic compounds, also known as NiTi. These alloys are present in most products markets for applications in automotive, aerospace and biomedical sectors. The high accuracy products for specialized applications need to be machined in order to be shaped to their final form. However, the properties of shape memory alloys difficult the machining consequently these materials are characterized by poor machinability.

The aim of this work is the characterization of NiTi alloy drilling process. With this goal in mind, this study was conducted in two NiTi alloys with different atomic percent nickel by using HSS and HM-E cutting tools and three different conditions, namely dry, wet and cryogenic machining. In order to understand which conditions influence the drilling of the alloy, the Design of Experiments (DoE) together with Response Surface Methodology (RSM) was the best approach, by reducing the number of experiments, maintaining the robustness of the planning.

The conducted experiments confirmed the difficulty to machine the shape memory alloy with high speed steel tools. It was found that the carbide cutting tools showed good performance when drilling in all machining conditions. It was also observed that using cryogenic machining condition led to better results in the quality of the drilled holes, which can confirm the initial belief that these conditions would improve the drilling process mechanisms. In the domain of the variables considered in this work it was verified that the combination of cutting parameters that leads to better results when drilling NiTi alloys corresponds to a cutting speed of 80 m/min and a feed of 0.08 mm/rot. The material that showed the best results was the alloy NiTi-3 (51.0 at. % Ni), with a higher percentage of nickel. The characterization of the material through the chip analysis revealed that the material has undergone structural change, which proofs the influence of the axial force and increased temperature on the quality of the holes produced.

Keywords: Shape memory alloy; NiTi; Drilling; DoE; Cryogenic; XRD

1 Introdução, Objetivos e Estrutura	1
1.1 Introdução	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objectivos	3
1.4 Estrutura da Dissertação	3
2 Revisão do Estado da Arte	5
2.1 Ligas NiTi	5
2.1.1 Diagrama de fase da liga Níquel-Titânio	7
2.1.2 Transformações de fase da liga	8
2.2 Transformação martensítica	9
2.3 Propriedades funcionais das SMAs	12
2.3.1 Superelasticidade	12
2.3.2 Efeito de memória de forma	14
2.4 Aplicações das SMAs	15
2.4.1 Indústria Automóvel	15
2.4.2 Indústria aeroespacial	17
2.4.3 Biomedicina	18
2.4.4 Robótica	20
2.5 Furação	21
2.6 Furação das ligas NiTi	24
2.7 Síntese	25
3 Metodologias e Procedimentos Experimental	27
3.1 Materiais e ferramentas utilizados	27
3.2 Condições de maquinagem	29
3.3 Equipamentos utilizados na furação	31
3.4 Desenho de Experiências e Metodologia de Superfície de Resposta	32
3.5 Técnicas de caracterização	37
3.5.1 Difracção por Raio-X	37
3.5.2 Calorímetro diferencial de varrimento	39

3.6	Aquisição e tratamento de imagem	40
4	Apresentação e Discussão de Resultados	41
4.1	Resultados Experimentais.....	41
4.2	Resultados da metodologia de superfície de resposta.....	46
4.2.1	Força axial	47
4.2.2	Binário	53
4.2.3	Ovalização	59
4.3	Influência dos Parâmetros de Corte	65
4.4	Resultados da análise das aparas	68
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	79
5.1	Conclusões e contribuições	79
5.2	Sugestão para trabalhos futuros	80
	Referências Bibliográficas	81
	Anexo A	85
	Anexo B	93
	Anexo C	95
	Anexo D	97
	Anexo E	103

Índice de Figuras

Figura 2.1 Diagrama de fase binário da liga NiTi, realçando o equilíbrio de fases da liga (Adaptado de [8])	8
Figura 2.2 Transformação de fase e mudança da estrutura cristalina das SMAs [10]	10
Figura 2.3 Influência do Ni na temperatura M_s na liga binária NiTi, de acordo com diferentes autores (pontos) e de acordo cálculos termodinâmicos (linha) [8]	11
Figura 2.4 Curvas de tensão – temperatura (esquerda) e tensão – deformação (direita), representando o comportamento superelástico [13]	12
Figura 2.5 Curva tensão deformação de um convencional e de uma liga SE [14]	13
Figura 2.6 Representação esquemática da deformação de um aço convencional e a liga NiTi [15]	13
Figura 2.7 Esquema do efeito de memória de forma nas ligas SMAs [13]	14
Figura 2.8 Representação esquemática do efeito de memória de forma: a) Simples (one-way); b) Duplo (two-way) [16]	15
Figura 2.9 Válvula de expansão termostática (Adaptado de [17])	16
Figura 2.10 Exemplos de aplicações da liga NiTi [18]	17
Figura 2.11 Atuadores TiNiPt instalados na estrutura serrilhada [18]	18
Figura 2.12 Aplicações possíveis da liga NiTi [18]	19
Figura 2.13 Visualização de um stent num vaso sanguíneo [2]	19
Figura 2.14 Mão robótica actuada por NiTi SMA [18]	20
Figura 2.15 Protótipo do produto funcional [19]	21
Figura 2.16 Geometria da broca: a) broca helicoidal; b) ponta da broca (Adaptado de [22])	22
Figura 2.17 Formas de apara segundo a norma ISO 3685 [22]	23
Figura 3.1 Brocas helicoidais: a) Broca de metal duro, DORMER R120; b) Broca de aço rápido, DORMER A920. [26]	29
Figura 3.2 Furação com criogenia	30
Figura 3.3 Caixa produzida para retenção das aparas	30
Figura 3.4 a) Centro de maquinagem CNC; b) Cabeça de alta velocidade	31
Figura 3.5 a) Dinamómetro Kistler; b) Carga multicanal Kistler; c) Sensor de binário; d) Sistema de aquisição de dados	32
Figura 3.6: Representação esquemática de um processo	33
Figura 3.7 Planeamento composto central do tipo circunscrito com coordenadas dos pontos	36
Figura 3.8 Esquema de um difractor de raio-X (Adaptado de [35])	38
Figura 3.9 Esquema usado na medição de raio-X de uma apara	39
Figura 3.10 Ciclo térmico do programa DSC	39
Figura 4.1 Esquema das experiências realizadas	42

Figura 4.2 Provetes depois maquinados da liga NiTi-2: (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4	42
Figura 4.3 Provetes depois maquinados da liga NiTi-3: (a) P5; (b) P6; (c) P7; (d) P8	43
Figura 4.4 Resultados da aquisição de dados, do furo NiTi2-B2-C8: (a) sinal original e filtrado da força axial; (b) sinal original e filtrado do binário	44
Figura 4.5 Análise da normalidade dos desvios - P4 (NiTi2, criogenia).....	48
Figura 4.6 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P4 (NiTi2, criogenia).....	48
Figura 4.7 Análise da normalidade dos desvios - P6 (NiTi3, emulsão)	49
Figura 4.8 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P6 (NiTi3, emulsão)	49
Figura 4.9 Análise da normalidade dos desvios - P8 (NiTi3, criogenia).....	50
Figura 4.10 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P8 (NiTi3, criogenia).....	50
Figura 4.11 Superfície de resposta	51
Figura 4.12 Comportamento da força axial consoante o avanço nos ensaios P4, P6 e P8 (velocidade constante, $v=42.5$ m/min).....	53
Figura 4.13 Análise da normalidade dos desvios - P4 (NiTi2, criogenia).....	54
Figura 4.14 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P4 (NiTi2, criogenia).....	54
Figura 4.15 Análise da normalidade dos desvios - P6 (NiTi3, emulsão)	55
Figura 4.16 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P6 (NiTi3, emulsão)	55
Figura 4.17 Análise da normalidade dos desvios - P8 (NiTi3, criogenia).....	56
Figura 4.18 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P8 (NiTi3, criogenia).....	56
Figura 4.19 Superfície de resposta	58
Figura 4.20 Comportamento do binário consoante o avanço nos ensaios P4, P6 e P8 (velocidade constante, $v=42.5$ m/min).....	59
Figura 4.21 Análise da normalidade dos desvios - P2 (NiTi2, emulsão)	60
Figura 4.22 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P2 (NiTi2, emulsão)	60
Figura 4.23 Análise da normalidade dos desvios - P4 (NiTi2, criogenia).....	61
Figura 4.24 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P4 (NiTi2, criogenia).....	61
Figura 4.25 Análise da normalidade dos desvios - P6 (NiTi3, emulsão)	62

Figura 4.26 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P6 (NiTi3, emulsão).....	62
Figura 4.27 Análise da normalidade dos desvios - P8 (NiTi3, criogenia)	63
Figura 4.28 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P8 (NiTi3, criogenia)	63
Figura 4.29 Superfície de resposta	64
Figura 4.30 Energia específica de corte em função do avanço (velocidade constante, $v=42.5$ m/min)	65
Figura 4.31 Energia específica de corte em função da velocidade de corte (avanço constante, $f=0.08$ mm/rot)	65
Figura 4.32 Potência de corte em função do avanço (velocidade constante, $v=42.5$ m/min)	66
Figura 4.33 Potência de corte em função da velocidade de corte (avanço constante, $f=0.08$ mm/rot)	67
Figura 4.34 Ovalização em função do avanço (velocidade constante, $v=42.5$ m/min).....	67
Figura 4.35 Ovalização em função do avanço (velocidade constante, $v=42.5$ m/min).....	68
Figura 4.36 Aparas obtidas na maquinagem: a) Furo NT2-B2-C7; b) NT2-B2-C4; c) NT2-B2-E2	69
Figura 4.37 Difratoograma do ensaio DRX ao material NiTi-2 à temperatura ambiente	69
Figura 4.38 Difratoograma do ensaio NT2-B1-C5 com o material base	70
Figura 4.39 NT-B1-C5 apenas a apara.....	70
Figura 4.40 FWHM dos ensaios analisados por DRX	72
Figura 4.41 Comparação da apara NT3-B2-C1 com o material base NiTi-3.....	73
Figura 4.42 DSC do início das aparas no aquecimento.....	73
Figura 4.43 DSC do fim das aparas no aquecimento	74
Figura 4.44 Comparação por DSC do início do furo dos ensaios NT3-B2-C1 com NT2-B2-C1	75
Figura 4.45 Comparação por DSC do início do furo dos ensaios NT3-B2-C1 com NT3-B2-C3	75
Figura 4.46 Comparação por DSC do início do furo dos ensaios NT3-B2-E3 com NT3-B2-C3	76
Figura 4.47 Comparação por DSC do início do furo dos ensaios NT2-B2-S1 com NT2-B2-C1	76

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Propriedades físicas e mecânicas de ligas com memória de forma [7]	7
Tabela 3.1 Propriedades físicas das ligas NiTi usadas na experiência	28
Tabela 3.2 Propriedades mecânicas das ligas NiTi usadas na experiência	28
Tabela 3.3 Propriedades das brocas utilizadas na operação de furação (Adaptado de [27]).....	29
Tabela 3.4 Atribuição dos valores das variáveis	37
Tabela 3.5: Planeamento DoE.....	37
Tabela 4.1 Valores da força axial e binário dos ensaios realizados	45
Tabela 4.2 Valores da ovalização dos ensaios realizados	46
Tabela 4.3 Tabela da análise da variância para a força axial do P4	47
Tabela 4.4 Tabela da análise da variância para a força axial do P6	48
Tabela 4.5 Tabela da análise da variância para a força axial do P8	50
Tabela 4.6 Tabela da análise da variância para o binário do P4.....	53
Tabela 4.7 Tabela da análise da variância para o binário do P6.....	54
Tabela 4.8 Tabela da análise da variância para o binário do P8.....	55
Tabela 4.9 Tabela da análise da variância para a ovalização do P2	59
Tabela 4.10 Tabela da análise da variância para a ovalização do P4	60
Tabela 4.11 Tabela da análise da variância para a ovalização do P6	61
Tabela 4.12 Tabela da análise da variância para a ovalização do P8	62
Tabela 4.13 Comparação dos ensaios com a força axial	71
Tabela 4.14 Temperatura e área do pico de transformação dos ensaios DSC.....	77

Os símbolos utilizados ao longo do trabalho são acompanhados dos respectivos significados. Contudo estes significados são apresentados na lista abaixo apresentada que está dividida em duas partes: Símbolos e siglas.

Símbolos

A_f	Temperatura final da fase austenítica
A_s	Temperatura inicial da fase austenítica
B	Binário (Nm)
Ex	Ovalização
Fa	Força axial (N)
f	Avanço (mm/rot)
M_s	Temperatura inicial da fase martensítica
M_f	Temperatura final da fase martensítica
S	Velocidade de rotação (rpm)
v	Velocidade de corte (m/min)
σ^{As}	Nível de estresse mínimo para iniciar a transformação de martensite para austenite
σ^{Ms}	Nível de estresse mínimo para iniciar a transformação de austenite em martensite

Siglas

ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
CENIMAT	Centro de Investigação em Materiais
CNC	Controlo Numérico Computorizado
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
DoE	<i>Design of Experiments</i>
DRX	Difracção de Raio-X
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
EFM	Efeito de Memória de Forma
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i>
HM	Metal duro
HSS	Aço rápido
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
SE	Superelasticidade
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
SIM	<i>Stress-induced martensite</i>
SMA	<i>Shape Memory Alloy</i>
SME	<i>Shape Memory Effect</i>
UNL	Universidade Nova de Lisboa

Introdução, Objectivos e Estrutura

1.1 INTRODUÇÃO

O incremento do conhecimento científico geralmente está associado a uma certa expectativa da melhoria da qualidade de vida e a ciência, que tem como objectivo explicar os fenómenos da natureza e tem sido a cada ano que passa explorada pela curiosidade humana. Novos materiais têm vindo a ser desenvolvidos de acordo com a necessidade de novas aplicações. No caso das ligas com memória de forma, apesar de serem conhecidas desde o início dos anos 30, o seu desenvolvimento continua em crescimento especialmente devido ao facto de estarem constantemente a surgir novas aplicações que levantam novos desafios. As propriedades incomuns deste material, tal como conseguir recuperar a sua forma mesmo sofrendo grandes deformações sem induzir deformações plásticas, faz com que seja considerado um material ideal para um vasto leque de aplicações.

As ligas de Níquel e Titânio considerada a liga metálica mais importante na classe dos materiais com memória de forma, pois é a que tem a maior capacidade de deformação recuperável por superelasticidade. Devido às suas propriedades, estas ligas têm variadas aplicações, como é o caso dos *stents* cardiovasculares e aparelhos ortodônticos, na área da medicina. No entanto, existe uma ampla gama de aplicações de produtos, especialmente nas indústrias aeronáutica, automóvel e robótica [1].

Os produtos de elevada precisão para aplicações especializadas precisam de ser maquinados para se obter uma dada forma final desejada. Contudo, estes materiais possuem reduzida maquinabilidade devido às suas propriedades.

Com este trabalho pretende-se utilizar o conhecimento científico dos materiais com memória de forma, mais propriamente da liga constituída por Níquel e Titânio, associá-lo ao conhecimento dos processos de maquinagem, neste caso a furação, e contribuir desta forma para o enriquecimento do conhecimento dos mecanismos do processo de furação quando se utilizam materiais com memória de forma.

1.2 MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento de novos materiais, com características específicas de acordo com a sua funcionalidade e diferentes dos materiais habitualmente utilizados, tem conduzido à necessidade de desenvolvimento tecnológico dos processos de fabrico utilizados.

A utilização das ligas com memória de forma tem vindo a generalizar-se devido aos desenvolvimentos do respectivo processo de produção com consequente redução do seu custo enquanto matéria prima. No entanto, o seu custo continua a ser elevado quando comparado com os materiais tradicionais, o que condiciona a sua utilização em áreas de alto valor acrescentado. Por outro lado, o fabrico de componentes de NiTi de grandes dimensões não é adequado devido aos elevados custos de material e processamento e os componentes são tipicamente de geometria simples, como arames, tubos ou placas de pequenas dimensões.

Os processos convencionais de corte por arranque de apara são influenciados pelo comportamento das ligas com memória de forma, o que conduz a um processamento difícil, com elevado desgaste das ferramentas e a má qualidade das peças obtidas. Porém, e com o objectivo de estabelecer novos campos de aplicação, o conhecimento da maquinagem desses materiais é essencial.

Sendo o processo normalmente utilizado neste tipo de materiais a furação, devido à necessidade de ligação a outros componentes, e como se trata essencialmente de peças de reduzida dimensão, a distância entre os furos obtidos condiciona a sua correcta montagem. Quando maquinadas as ligas com memória de forma, devido às suas propriedades, induzem desvios geométricos e dimensionais que podem comprometer a ligação.

Desta forma, a principal motivação para a realização deste trabalho é poder oferecer um contributo ao conhecimento existente acerca da maquinagem de ligas NiTi com memória de forma, nomeadamente do processo de furação, a fim de identificar as condições mais favoráveis para a realização de componentes de forma eficiente, sem desperdício de recursos e cumprindo os habitualmente exigentes requisitos dimensionais dos componentes produzidos com efeito mínimo sobre as características SMA.

1.3 OBJECTIVOS

O objectivo deste trabalho é a caracterização do processo de furação das ligas NiTi e dos componentes assim produzidos, abordando os pontos seguintes:

- ✓ Determinar quais os melhores parâmetros para a furação de ligas Níquel Titânio;
- ✓ Comparar diferentes condições de corte, utilizando emulsões e criogenia;
- ✓ Analisar a geometria dos furos obtidos na peça maquinada pelo processo de furação;
- ✓ Analisar os possíveis desvios geométricos e dimensionais induzidos pelo processo;
- ✓ Analisar as possíveis alterações produzidas no material pelo aumento da força e temperatura durante o processo.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em cinco partes: **Introdução, Estado da Arte, Procedimento experimental, Resultados e Conclusões**, com os conteúdos a seguir indicados:

Introdução – Esta primeira parte consiste no Capítulo 1. Neste capítulo contextualiza-se o tema e apresenta-se a motivação que conduziu a este trabalho. Procede-se ainda à definição dos objectivos a atingir com o trabalho conducente a esta dissertação e apresenta-se a estrutura do documento.

Estado da Arte – Consiste no Capítulo 2 onde é exposto o resultado da pesquisa bibliográfica realizada. São apresentados os fundamentos teóricos para uma melhor compreensão do tema, abordando-se o estado da arte que incide sobre as matérias relevantes para esta dissertação.

Procedimento Experimental – O capítulo 3 consiste na apresentação das metodologias e processos experimentais para a realização deste trabalho e a aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) a partir do Desenho de Experiências (DoE). São ainda apresentadas as técnicas de caracterização dos materiais.

Resultados – Em seguida, no Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados relativos ao procedimento experimental.

Conclusões – Finalmente, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões relativas ao trabalho experimental e sugestões para desenvolvimentos futuros.

Revisão do Estado da Arte

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos e estudos existentes do processo de furação nas ligas com memória de forma, servindo de base para o trabalho conducente a esta dissertação. Neste capítulo são abordados temas como, ligas com memória de forma com especial foco nas ligas NiTi, processo de furação, ferramentas de corte (broca helicoidal) e por fim uma revisão bibliográfica incidente sobre a furação das ligas NiTi.

2.1 LIGAS NiTi

As ligas com memória de forma (SMAs, do inglês *Shape Memory Alloys*) pertencem a um grupo de materiais metálicos que têm a capacidade de recuperar a sua forma previamente definida quando submetidos a um procedimento termomecânico apropriado. Estas ligas destacam-se dos restantes materiais utilizados em engenharia pois possuem duas propriedades especiais, o efeito de memória de forma (SME) e a superelasticidade (SE). As propriedades das SMAs são conhecidas desde a década 30, porém somente na década de 60 é que surgiram pesquisas avançadas realizadas no ramo das ligas com memória de forma.

Em 1959 William Buehler (metalúrgico que trabalhava para o *US Naval Ordnance Laboratory*) estava a tentar produzir um novo “nariz” cónico para mísseis com maior resistência à fadiga, calor e força de impacto e verificou que uma liga de composição equiatômica de Níquel e Titânio cumpria estes requisitos de forma muito satisfatória. Em 1961 apresentou uma amostra da liga numa reunião do laboratório que se apresentava toda dobrada tipo um acordeão e foi passada por todos os presentes de forma a poderem deformá-la como quisessem e observassem a sua resistência à fadiga. Um dos presentes nessa reunião, o Dr. David S. Muzzey (um dos Directores Técnicos Associados), que era um fumador de cachimbo, aqueceu a amostra com o seu isqueiro. Para espanto de todos os presentes a amostra começou a “esticar” longitudinalmente e a voltar à sua forma inicial. Estas ligas também são conhecidas pelo nome de NiTiNol, donde o “Ni” e “Ti” são símbolos

químicos do Níquel e Titânio e a terminação “*no1*” provém das siglas “*Naval Ordnance Laboratory*” [1].

Desde então as ligas de Níquel-Titânio (NiTi) começaram a despertar interesse tanto pelos aspectos metalúrgicos, como relativamente às potenciais aplicações práticas, que começaram a ser exploradas, primeiro a nível militar e mais tarde com aplicações bastante difundidas nos mais diversos campos da ciência desde a aeronáutica à medicina. A aplicabilidade na biomedicina tem sido bastante utilizada devido à sua característica de biocompatibilidade. Este biomaterial é actualmente utilizado em fios ortodônticos, materiais ortopédicos, fios guia ou *stents* [2].

A produção das ligas NiTi é um grande desafio tecnológico devido à dificuldade do controlo da composição química, onde a variação de 0,1 at. % de Níquel resulta numa variação de temperatura de transformação de aproximadamente 10 °C [3]. Devido à elevada reactividade do Titânio, a fusão destas ligas tem que ser feita em vácuo ou atmosfera inerte, sendo por isso comum utilizar-se processos de produção como fusão por arco eléctrico, por feixe de electrões ou por indução em vácuo [4]. Estes processos de produção estão associados a custos elevados devido à complexidade dos processos de fabrico e dos padrões de qualidades exigidos, pois como foi referido anteriormente pequenas divergências podem resultar em grandes alterações nas propriedades finais. Apesar de estas ligas terem um custo elevado quando comparado com outros materiais metálicos (por exemplo Alumínio, Cobre, Titânio), o preço das mesmas tem diminuído nos últimos anos em consequência do desenvolvimento a nível técnico da sua produção e pela sua aceitação no mercado numa grande variedade de produtos comerciais. A utilização e comercialização das ligas devem-se às suas propriedades especiais, porém a sua maquinaria é geralmente difícil, exigindo ferramentas e procedimentos experimentais dedicados [5].

A base das ligas NiTi com memória de forma é o composto intermetálico equiatómico de Níquel e Titânio, que após sofrer várias deformações possui a capacidade de recuperar a sua forma inicial. Este apresenta uma solubilidade de Ni e Ti, que permite a modificação significativa tanto das suas propriedades mecânicas como das temperaturas de transformação, sendo comum estas ligas apresentarem Níquel em excesso, podendo atingir cerca de 1 % [5]. Comparado com outras ligas com memória de forma, a liga NiTi SMA destaca-se devido às suas excelentes propriedades como o efeito de memória de forma (EFM) e a superelasticidade (SE). Devido à sua camada de óxido resistente as ligas NiTi são caracterizadas por uma boa resistência à corrosão, deformação, fadiga e biocompatibilidade [5, 6]. A Tabela 2.1 apresenta as propriedades físicas típicas de diferentes ligas com memória de forma e ilustra os benefícios da liga NiTi em comparação com outros SMAs (CuZnAl, liga constituída por Cobre, Zinco e Alumínio; CuAlNi, liga constituída por Cobre, Alumínio e Níquel). Os conceitos de deformação *one-way* e *two way* são explicados no ponto 2.3.

Tabela 2.1 Propriedades físicas e mecânicas de ligas com memória de forma [7]

Propriedades	Unidades	NiTi	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
Ponto de fusão	°C	1250	1050	1020
Massa volúmica	g/cm ³	6.4 – 6.5	7.5-8.0	7.1-7.2
Condutividade térmica a 20°C (A; M)	W / m. K	8.6; 18	84; 120	30; 75
Capacidade calorífica	J / Kg . K	490	440	390
Coeficiente de dilatação (A; M)	μ . m / K	11; 6.7	17; -	18; -
Módulo de Young (A; M)	GPa	70-83; 23-41	80-100	70-100
Tensão de cedência	MPa	100-130	70	40
Tensão de Rotura	MPa	875	800	700
Max. deformação recuperável (<i>one-way</i>)	%	6-8	4-6	4-6
Max. deformação recuperável (<i>two-way</i>)	%	3.2	1	0.8
Histerese	K	2-50	5-20	20-40
Resistência à corrosão		++	+	o
Biocompatibilidade		++	-	-

“o” significa a média, tendo em conta a seguinte classificação: muito bom: ++, bom: +, média: o, mau: -, muito mau: --

A - Austenite

M- Martensite

2.1.1 Diagrama de fase da liga Níquel-Titânio

A Figura 2.1 apresenta as composições do NiTi no diagrama de fase NiTi, onde se pode observar todas as mudanças de estrutura presentes com quantidades de Níquel que variam entre 0 a 100 % e em temperaturas que variam de 0 °C a 1800 °C. O diagrama de fases da liga NiTi é de importante compreensão nos tratamentos térmicos necessários para melhorar as características do efeito de memória de forma e de superelasticidade.

A região central do diagrama, fase TiNi, limitada pelas faces Ti₂Ni e TiNi₃, é considerada a de maior interesse, pois permite-nos constatar a presença de um domínio de estabilidade de fase austenítica. Analisando detalhadamente o realce da Figura 2.1, região central do diagrama de fases NiTi, conseguimos observar que para temperaturas de aproximadamente 630 °C a liga NiTi sofre à esquerda (lado rico em Ti) uma reacção peritética $L + \text{TiNi} \Rightarrow \text{Ti}_2\text{Ni}$ e à direita (lado mais rico em Ni) uma reacção eutética $L \Rightarrow \text{TiNi} + \text{Ni}_3\text{Ti}$. A fase TiNi, em altas temperaturas apresenta uma estrutura ordenada cúbica de corpo centrado do tipo B2, fase austenítica. Em temperaturas mais baixas, apresenta uma fase martensítica (B19') com uma estrutura cúbica de face centrada, obtida na

etapa de transformação de B2 \rightarrow B19'. Contudo nesta transformação ocorre uma fase romboédrica R, que apresenta uma estrutura tetragonal [1].

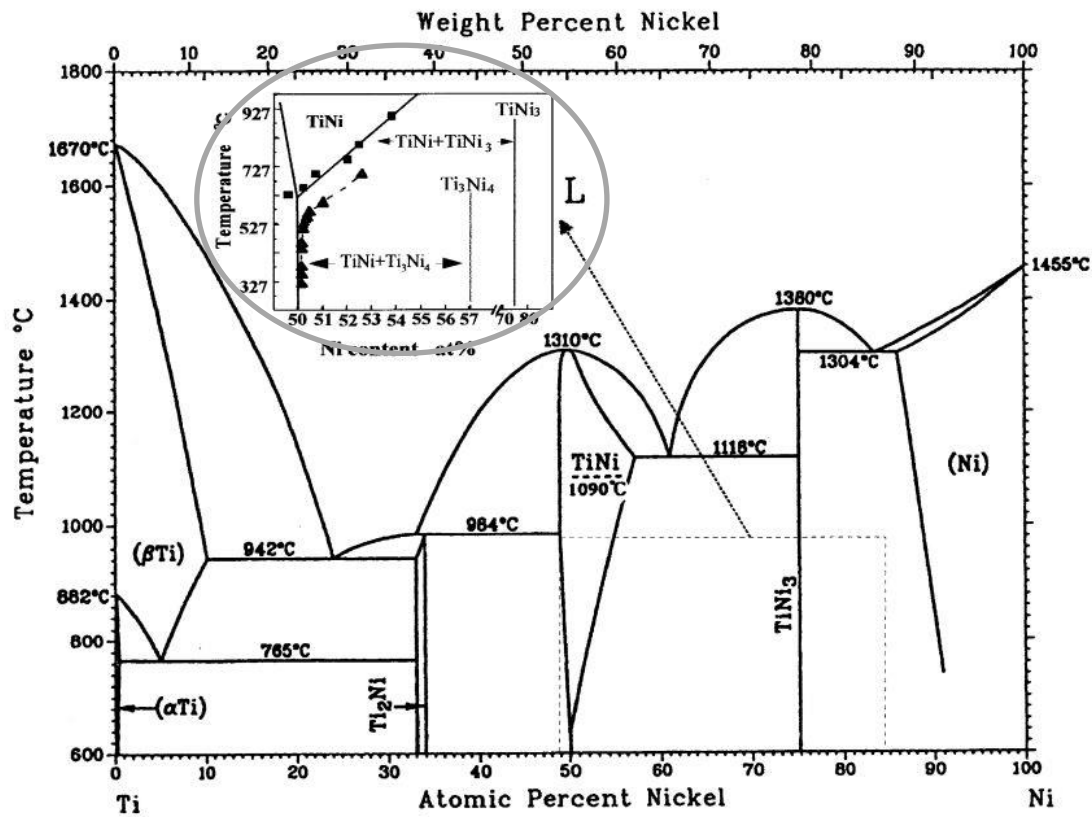


Figura 2.1 Diagrama de fase binário da liga NiTi, realçando o equilíbrio de fases da liga (Adaptado de [8])

De notar que a estabilidade ocorre para ligas mais ricas em Ni relativamente à composição equiatômica, devido a uma forte variação do limite máximo de solubilidade do Ni com a temperatura. Para as ligas mais ricas em Ti relativamente à composição estequiométrica, a variação de solubilidade com a temperatura é muito mais reduzida. Este domínio de estabilidade da austenite permite a exploração da possibilidade de variação das temperaturas de transformação da liga NiTi com recurso a tratamentos de solubilização seguidos de precipitação a diferentes temperaturas [5].

2.1.2 Transformações de fase da liga

A liga de NiTi é uma liga polimórfica, ou seja, dependendo da temperatura ou da tensão, ela apresenta diferentes estruturas cristalinas. Cada fase tem uma estrutura cristalina caracterizada por uma organização na disposição espacial dos átomos diferente em relação às propriedades (efeito de memória de forma e superelasticidade). Normalmente a estrutura é definida através da análise por difracção de raios X ou DSC (*Differential Scanning Calorimetry*).

- **Fase Austenítica (B2)**

Como foi referido anteriormente, a liga NiTi apresenta uma fase austenítica em alta temperatura, fase estável da liga. Esta é caracterizada por ser uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), onde a partir da austenite é formada a martensite, dependendo da composição química da liga. Esta geometria é constituída de átomos localizados nos oito vértices e um único átomo no centro do cubo. O factor de empacotamento atómico é de 0.68 [5].

- **Fase Martensítica (B19')**

Na fase martensite maclada, a aplicação de um carregamento mecânico pode levar à fase martensite desmaclada num processo designado de desmaclagem, no qual se dá uma reorientação da estrutura cristalina do material. A estrutura martensite (B19') tem uma estrutura monoclinica, e é a mais estável a baixas temperaturas e elevadas tensões. A martensite apresenta 24 orientações cristalográficas diferentes, em que as orientações estão relacionadas com as transformações sofridas pelo material [5].

- **Fase R**

A Fase R (de estrutura tetragonal) das ligas de NiTi, é uma fase intermediária metastável que corresponde a uma distorção da configuração atómica da fase austenítica e pode ocorrer ou não na transição entre esta e a fase martensítica. A estrutura pode ser entendida como uma distorção de rede cúbica segundo uma das diagonais principais da célula unitária cúbica de austenite. Esta distorção da rede aumenta quando a temperatura diminui, mas com o prosseguimento do arrefecimento, surge a transformação martensítica [5].

Existem três possibilidades para o aparecimento da fase R durante o processo de transformação nas ligas NiTi, quando:

- Parte da concentração de Ni é substituída por Fe, Al ou Cu;
- Tratamento térmico nas ligas NiTi₉₀;
- Ligas de NiTi ricas em Ni são envelhecidas a temperaturas específicas (400 °C).

Nos casos em que a liga é submetida a tratamentos térmicos, a fase R pode aparecer dependendo da temperatura de recozimento do material. Apenas aparece nas ligas que tiverem um tratamento térmico em baixas temperaturas (inferior a 550 °C) [5] [9].

2.2 TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

As propriedades superelásticas e de efeito memória de forma encontradas nestas ligas tornam-se possíveis devido a uma transformação de fase que ocorre no estado sólido, no qual se dá um rearranjo dos átomos para uma estrutura cristalina nova, mas com composição química idêntica

à inicial. Esta transformação é chamada de transformação de fase martensítica, ilustrada através do diagrama da Figura 2.2. A fase austenítica (fase-mãe), caracteriza-se por ser estável para baixos níveis de tensões ou altas temperaturas, por um elevado módulo de elasticidade e por uma estrutura cristalina cúbica, simétrica e ordenada. A fase martensítica (fase-produto) é caracterizada pela sua estabilidade a níveis elevados de tensão ou baixas temperaturas, pelo baixo módulo de elasticidade e por uma estrutura cristalina monoclinica, menos ordenada [1].

A maioria dos metais deforma-se através do deslizamento em planos de estrutura cristalina, enquanto na deformação dos NiTi os átomos são rearranjados numa nova estrutura cristalina, mantendo a composição química. Esta transformação cristalográfica ocorre sem a difusão dos átomos, mas através de um movimento cooperativo e homogêneo de vários átomos, numa ordem de grandeza inferior à ordem de grandeza do parâmetro de rede da estrutura cristalina considerada [5]. Por esta razão é considerada uma transformação de fase quase instantânea, para além de poder ocorrer a temperaturas baixas onde a mobilidade dos átomos é geralmente muito baixa.

Devido à influência da temperatura ser bastante importante para o tipo de comportamento que estas apresentam, existem quatro temperaturas bem definidas para todas as ligas com memória de forma:

- M_s temperatura de início da transformação de austenite em martensite (em arrefecimento)
- M_f temperatura de fim da transformação de austenite em martensite (em arrefecimento)
- A_s temperatura de início da transformação de martensite em austenite (em aquecimento)
- A_f temperatura de fim da transformação de martensite em austenite (em aquecimento)

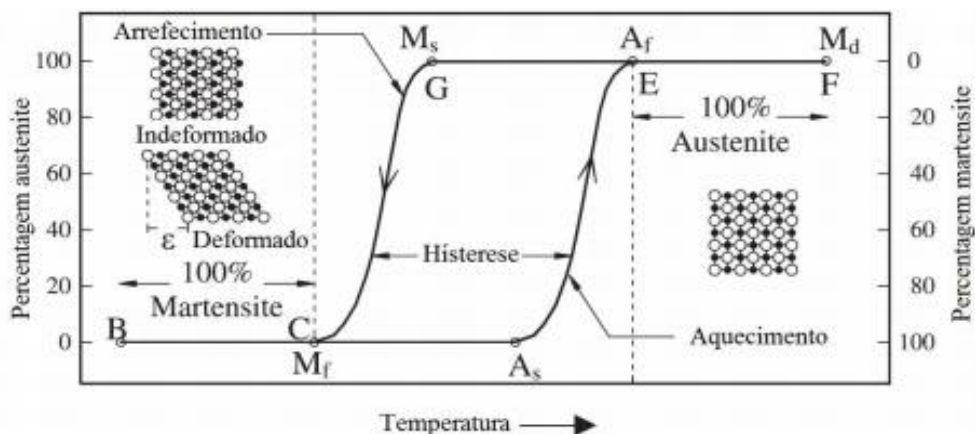


Figura 2.2 Transformação de fase e mudança da estrutura cristalina das SMAs [10]

As temperaturas de transformação de fase são características de cada liga, e variam em função da composição química e dos tratamentos térmicos aplicados na liga. Na transformação de fase ocorre um ciclo de arrefecimento e aquecimento, representado na Figura 2.2, que é denominado histerese térmica. Ainda na mesma figura relacionam-se as mudanças de fase das ligas de acordo com a variação da temperatura. Partindo de uma fase 100 % austenítica (ponto E) e arrefecendo progressivamente a liga até ao ponto G, a percentagem de austenite começa a diminuir e a de martensite começa a aumentar até se tornar a fase dominante (ponto C). O processo pode ser invertido aquecendo a liga e voltar ao ponto inicial (ponto E). A temperatura acima da qual a transformação austenite em martensite induzida por tensão deixa de poder ter lugar, é denominada M_d [11]. Acima da temperatura M_d a liga NiTi tem um comportamento como os metais comuns, perdendo as propriedades de efeito de memória e de superelasticidade.

A Figura 2.3 mostra que a temperatura de transformação M_s depende fortemente da concentração de Ni, realçando o que já tinha sido referido no tópico anterior. Significa que uma liga rica em Ti tem um comportamento semelhante ao das ligas de 50 at. % NiTi [8]. No caso de uma liga rica em Ni, um aumento da composição de Ni provoca uma diminuição drástica da temperatura M_s . Teoricamente, a temperatura de transformação cai para próximo de 0 quando a fracção molar de Ni exceder ligeiramente os 51.5 %.

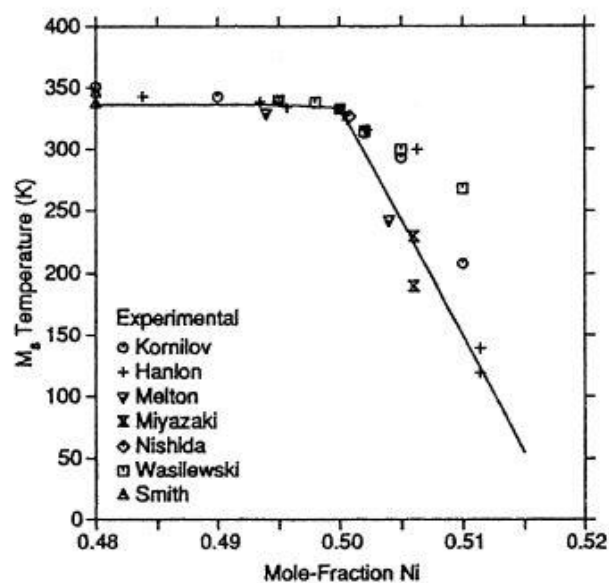


Figura 2.3 Influência do Ni na temperatura M_s na liga binária NiTi, de acordo com diferentes autores (pontos) e de acordo cálculos termodinâmicos (linha) [8]

2.3 PROPRIEDADES FUNCIONAIS DA SMAS

As propriedades especiais das SMAs são o efeito de memória de forma e a superelasticidade. O efeito de memória de forma é uma propriedade funcional e pode estar presente na liga como efeito de memória simples (*one-way*) se ocorrer recuperação da deformação aplicada após aquecimento, ou então como efeito de memória duplo (*two-way*) se a liga apresentar também o efeito de memória de forma após o arrefecimento. Este efeito de memória duplo é conseguido através de um treino termomecânico da liga. A superelasticidade, também conhecida como pseudoelasticidade, também é uma propriedade funcional, semelhante ao efeito de uma borracha.

O efeito de memória de forma pode ser observado em SMAs na fase martensítica. No entanto, a superelasticidade, baseada em transformação por aplicação de cargas, só é possível a partir da fase-mãe.

2.3.1 Superelasticidade

A superelasticidade é uma característica presente nas SMAs, em particular nas ligas NiTi. Quando a tensão de deformação aplicada é removida, o material volta à sua forma inicial. As ligas podem ser “programadas” consoante a sua composição química e tratamentos termomecânicos, de modo que a recuperação de forma ocorra apenas com a retirada da tensão [12].

Este fenómeno é atribuído à transformação mecânica de inversão que ocorre da fase austenítica para a fase martensítica, que também é denominado como martensite induzida por tensão (SIM). A transformação causada pela solicitação mecânica aplicada, ocorre a uma temperatura constante e superior a A_f como se pode observar na Figura 2.4 (esquerda).

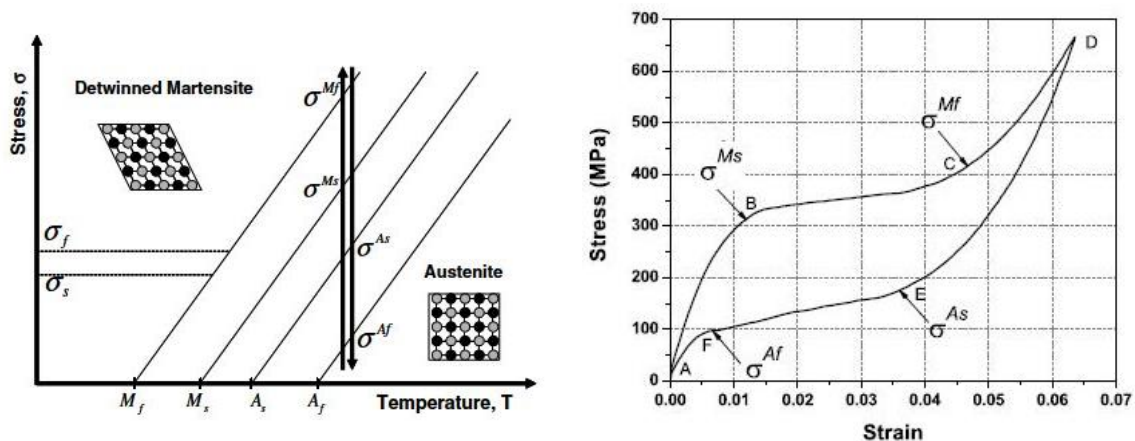


Figura 2.4 Curvas de tensão – temperatura (esquerda) e tensão – deformação (direita), representando o comportamento superelástico [13]

De forma a entender melhor o mecanismo da superelasticidade consideramos a carga cíclica apresentada na Figura 2.4 (direita). De A para B a fase austenítica sofre uma carga elástica. O ponto

B é o nível mínimo para iniciar a transformação de austenite em martensite induzida por tensão (σ^M_s). A transformação ocorre porque a fase austenítica se torna instável e a martensite induzida por tensão começa a formar-se. No ponto C só existe martensite desmaclada devido à reorganização da martensite maclada durante o patamar B-C. De C para D existe carga elástica da martensite desmaclada. Ao diminuir a tensão aplicada durante a descarga, a martensite irá descarregar elasticamente do ponto D até ao ponto E. Em E é assinalado o início da transformação da martensite em austenite (σ^A_s). A transformação inversa ocorre devido à desestabilização termodinâmica de martensite. Este processo é acompanhado pela recuperação da deformação, devido à transformação de fase no fim da descarga. No ponto F a transformação da martensite para austenite fica completa e o material continuará com a descarga até chegar ao ponto inicial, A. Se o carregamento ultrapassar o ponto D ocorrem deformações plásticas não recuperáveis na martensite e caso as deformações persistam o elemento pode mesmo atingir a rotura. Neste caso o material perde a propriedade de superelasticidade.

Na Figura 2.5 é possível identificar a superelasticidade da liga NiTi associada a uma grande deformação recuperável até 8 % [7]. A SE como propriedade funcional destas ligas, faz com que estas tenham interesse em aplicações específicas quando comparadas com uma liga convencional, tanto para grandes deformações recuperáveis ou para níveis de tensão constante.

A Figura 2.6 mostra, numa perspectiva da estrutura, a diferença entre a deformação de um aço inoxidável convencional, o qual acomoda os níveis de tensão mais elevados por escorregamento de deslocações irreversível, enquanto a liga de NiTi superelástica acomoda maior deformação em um processo de inversão.

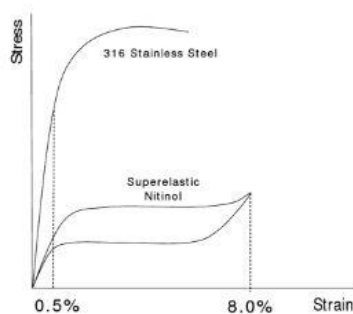


Figura 2.5 Curva tensão deformação de um convencional e de uma liga SE [14]

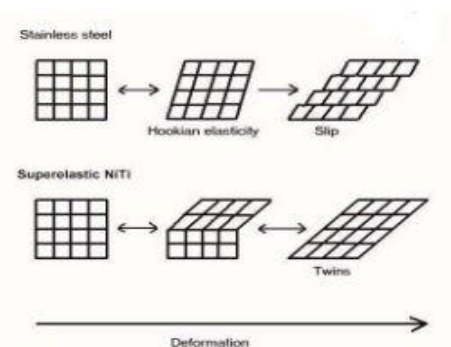


Figura 2.6 Representação esquemática da deformação de um aço convencional e a liga NiTi [15]

2.3.2 Efeito de memória de forma

O efeito de memória de forma (SME) é a capacidade do material memorizar uma forma predefinida, mesmo depois de várias deformações. O efeito de memória de forma é um fenômeno no qual um material deformado abaixo da temperatura A_s recupera a sua forma original devido à transformação inversa por aquecimento acima da temperatura A_f . Este fenômeno pode ser explicado com a ajuda da Figura 2.7, através de um caminho de carga termomecânica num espaço de Tensão - Deformação - Temperatura. De notar que a figura apresentada é para o caso simples de SME, denominado efeito *one-way* de SME ou efeito de memória simples.

Observando a Figura 2.7 e partindo do ponto A, fase austenítica, o material é arrefecido até uma temperatura abaixo da temperatura M_s , sendo a martensite maclada formada no ponto B. Depois do material estar completamente martensítico, inicia-se o carregamento uniaxial até atingir a tensão σ^s . Depois deste ponto, os grãos do material começam a reorientar-se, processo este que necessita de uma tensão muito inferior do que a resistência à deformação plástica da martensite. Este processo, denominado desmaclagem, é realizado desde o nível de tensão σ^f até ao fim do carregamento, ponto C. O próximo passo é a descarga de elasticidade elástica do material até ao ponto D. Em seguida, um processo de aquecimento conduz a que o material sofra nova transformação. A transformação da martensite para austenite começa acima da temperatura A_s (ponto E) e apenas é completado quando o material atinge a temperatura A_f (ponto F). Em A o material recupera a sua forma original. [12]

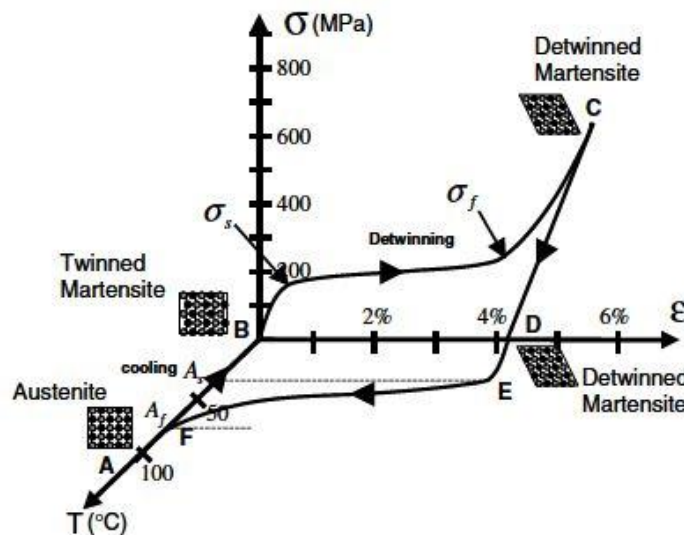


Figura 2.7 Esquema do efeito de memória de forma nas ligas SMAs [13]

No efeito de memória simples o material memoriza a sua forma aplicada porém, para se obter o fenômeno efeito de memória duplo, é necessário memorizar a forma na fase martensítica. Este fenômeno é caracterizado por uma mudança de forma espontânea da liga com memória de forma

quando ela é aquecida e arrefecida alternadamente na ausência de carregamento mecânico (Figura 2.8). Este fenómeno deve-se a um tratamento termomecânico da liga, denominado treino [13].

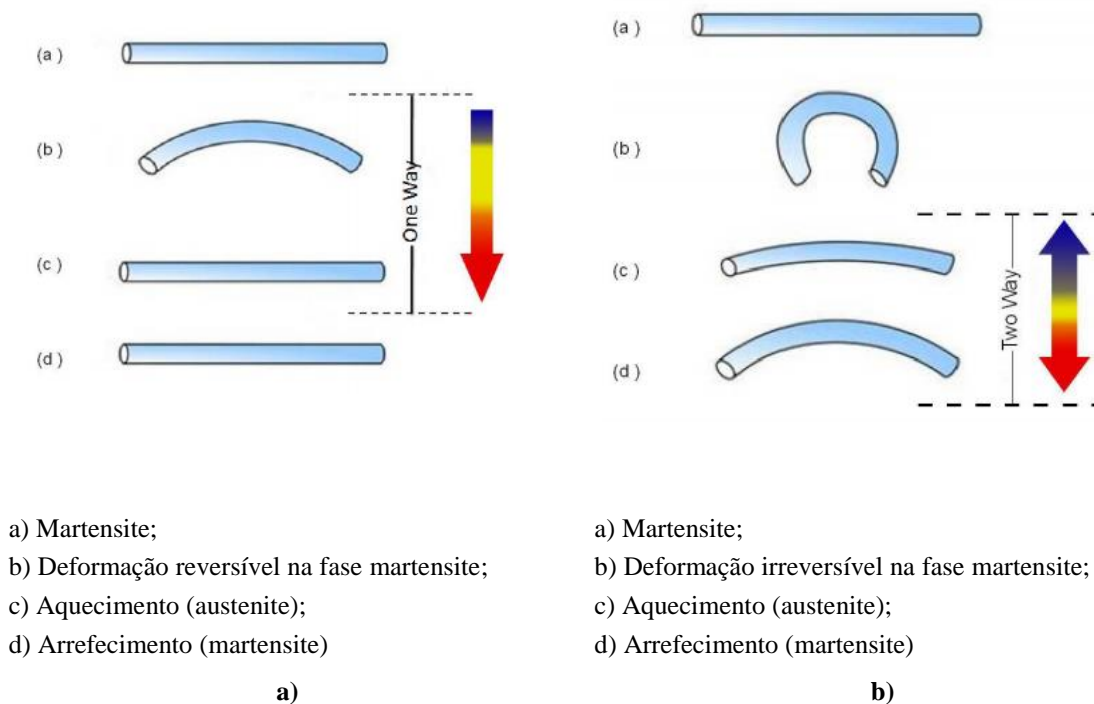


Figura 2.8 Representação esquemática do efeito de memória de forma: a) Simples (one-way); b) Duplo (two-way) [16]

2.4 APLICAÇÕES DAS SMAS

A liga NiTi é das ligas com memória de forma com mais aplicação em diferentes indústrias, devido às suas propriedades. A aplicação destas ligas aumentou fortemente na década de 90, resultando um aumento de produção e uma diminuição de custo das mesmas.

2.4.1 Indústria Automóvel

Devido à constante busca por veículos cada vez mais seguros, mais confortáveis e com melhores desempenhos, o número de sensores e actuadores presentes no automóvel moderno está a aumentar. Actuadores produzidos em ligas com memória de forma têm aqui uma grande oportunidade como alternativa a actuadores electromagnéticos ou até mesmo hidráulicos. Na maioria das aplicações que podemos observar nos automóveis actuais estes actuadores têm um funcionamento linear e funcionam como actuadores térmicos activos (por exemplo como controlo de temperatura do motor). No entanto, devido às capacidades morfológicas das ligas com memória de forma, as suas áreas de aplicação têm vindo a aumentar, nomeadamente para áreas como a aerodinâmica e até mesmo a nível estético (*design*).

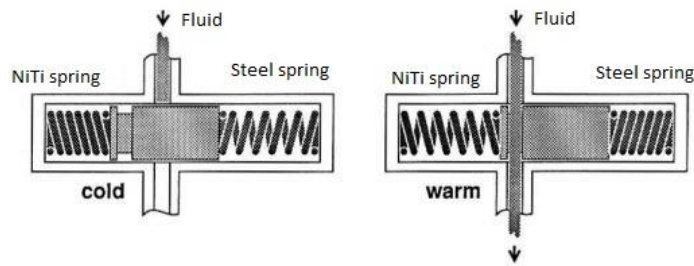


Figura 2.9 Válvula de expansão termostática (Adaptado de [17])

A simplicidade mecânica e compactidade dos actuadores de ligas com memória de forma permite a redução do tamanho, do peso e, consequentemente, dos custos de vários componentes automóveis o que oferece melhorias substanciais no desempenho quando comparados com os componentes convencionais. A Figura 2.9 mostra o funcionamento de um componente automóvel usando uma SMA, actuada consoante a temperatura do fluido.

A *General Motors* (GM) afirma que os seus engenheiros trabalham com ligas com memória de forma desde meados dos anos 90 do século passado. Até agora a GM conseguiu 247 patentes e, recentemente, a sétima geração do *Chevrolet Corvette* foi o primeiro veículo com um actuador de ligas com memória de forma (nomeadamente NiTi) que abre uma pequena saída que permite sair o ar do compartimento da bagageira quando este é fechado para facilitar o fecho do mesmo [18].

Algumas das futuras aplicações passam, por exemplo, por geradores eléctricos que funcionam recorrendo ao calor do escape do automóvel, apêndices aerodinâmicos que se podem recolher através de actuadores de NiTi quando o veículo circula a alta velocidade para diminuir o arrasto aerodinâmico e portas adaptáveis que permitem uma abertura mais facilitada das portas [18].

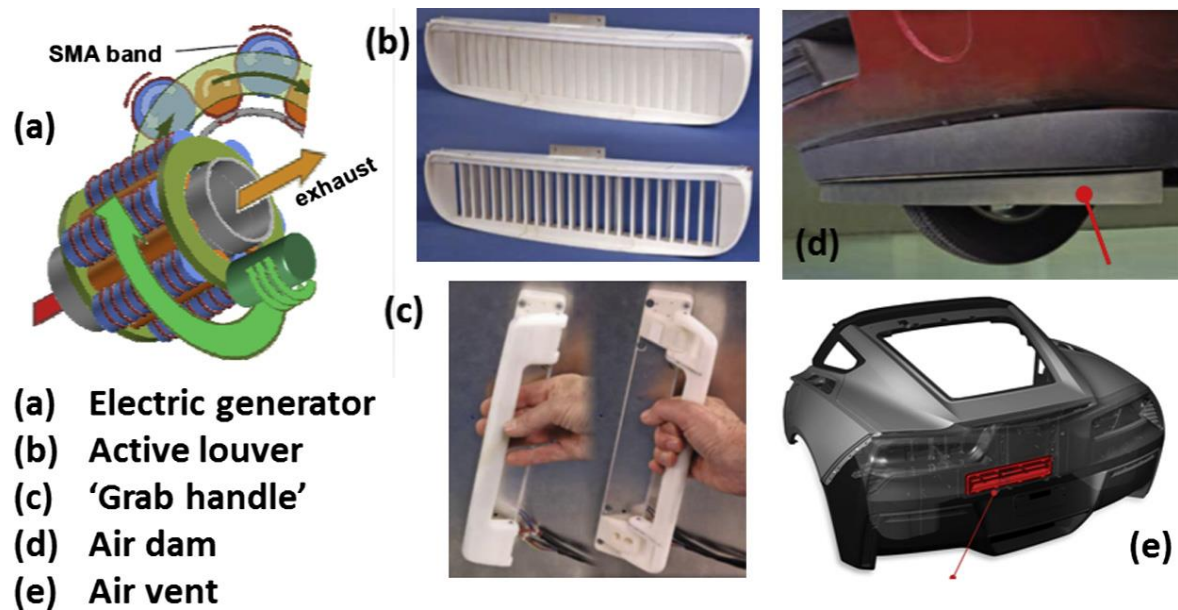


Figura 2.10 Exemplos de aplicações da liga NiTi [18]

2.4.2 Indústria aeroespacial

Desde o grande sucesso que foi a implementação de ligas com memória de forma em linhas hidráulicas nos jactos de combate *F-14* na década de 1970, as propriedades únicas destas ligas ganharam grande interesse em aplicações aeroespaciais, aplicações estas que são sujeitas a grandes cargas dinâmicas e muito frequentemente têm grandes limitações de espaço. Alguns exemplos destas aplicações são actuadores, conectores estruturais, vedantes, mecanismos de libertação ou acoplamento, entre outros.

A *Boeing* desenvolveu uma estrutura em formato de serra (Figura 2.11) que está presente no escape dos motores a jacto *GE90-115B* do seu avião *Boeing 777-300 ER* e que através de actuadores de ligas com memória de forma instalados nos “dentes” dessa estrutura consegue variar o seu formato. Esse dispositivo tem-se mostrado bastante eficaz, dado permitir reduzir o barulho durante a descolagem, por aumentar a capacidade de deflexão no escape, e aumentar a eficiência do motor em velocidade de cruzeiro, diminuindo a deflexão no escape durante o resto do voo. Devido às temperaturas elevadíssimas que são verificadas no escape deste tipo de motores, as ligas NiTi mostraram alguma dificuldade em manter um funcionamento correcto. Desta forma, foi desenvolvida uma nova liga, em parceria com a *NASA* no *Glenn Research Center*, constituída por Níquel, Titânio e Platina (TiNiPt), cuja designação é HTSMA (*High-Temperature Shape Memory Alloy*) [18].

A investigação na área continua e incide sobretudo ao nível de componentes do motor, mais especificamente ao nível do rotor e das próprias pás. A variação do ângulo das pás ao nível do rotor

ou mesmo do formato das pás permite possibilidades enormes em relação à eficiência dos motores nos seus diferentes regimes de funcionamento.

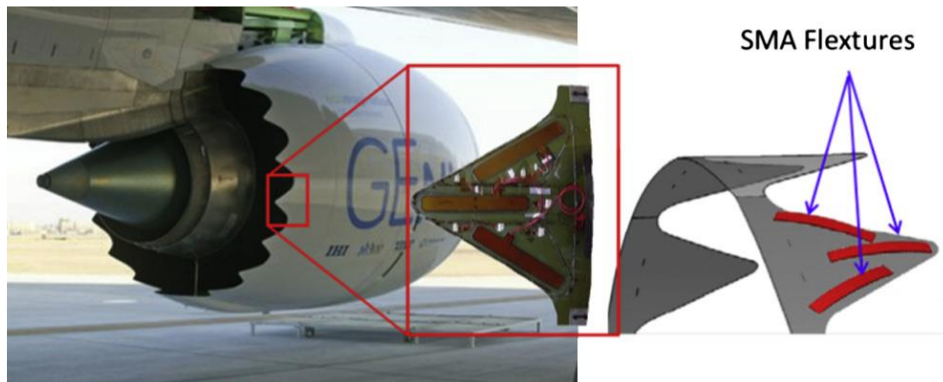


Figura 2.11 Atuadores TiNiPt instalados na estrutura serrilhada [18]

2.4.3 Biomedicina

As aplicações destas ligas na área da medicina e biomedicina têm sido inúmeras e de grande importância, nas áreas ortodontia, cirúrgica (cirurgias pouco invasivas) e de diagnóstico, através de métodos inovadores. Apesar das ligas NiTi serem significativamente mais caras do que os aços inoxidáveis, estas ligas apresentam alta resistência à corrosão, biocompatibilidade e são não magnéticas. Estas particularidades aproximam-se bastante do comportamento dos ossos e outros tecidos humanos [18].

A necessidade de instrumentos pequenos de grande precisão e fiabilidade para alcançar um posicionamento e funcionamento correctos em tratamentos médicos complexos atribui às ligas com memória de forma uma grande vantagem em relação a outros materiais e um potencial comercial elevadíssimo.

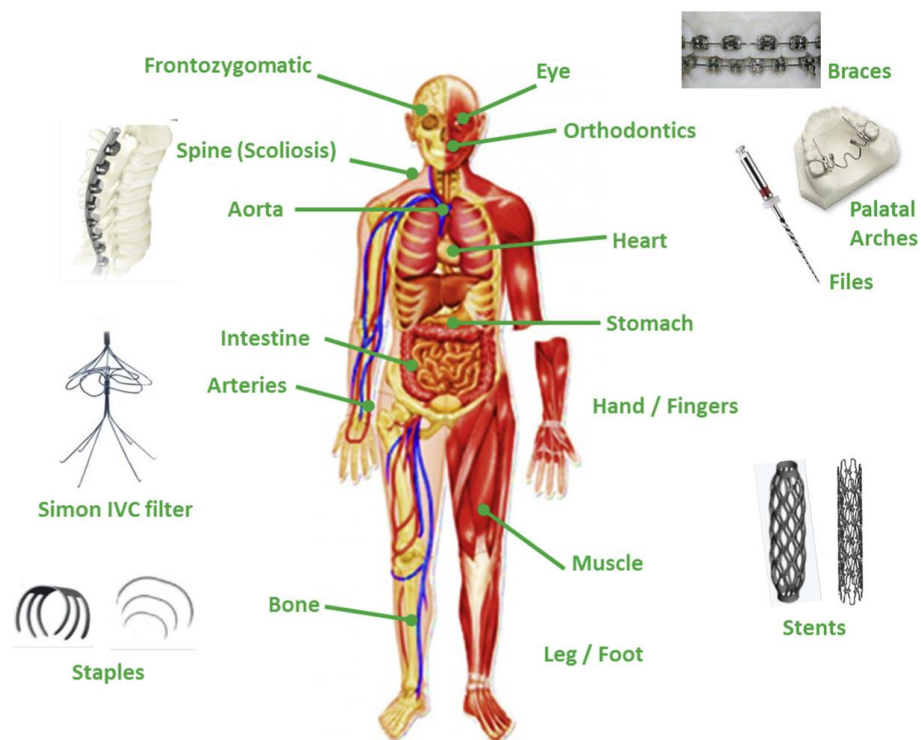


Figura 2.12 Aplicações possíveis da liga NiTi [18]

A Figura 2.12 demonstra bem as mais diversas áreas onde a aplicação destas ligas é possível, desde agrafos para suturar lacerações em que se pode controlar o ajuste dos mesmos após feita a sutura a aplicações para correcção progressiva de escolioses.

Uma das aplicações é por exemplo a criação de pequenas estruturas tubulares (*stents*) que podem ser aplicadas no interior dos vasos sanguíneos do paciente durante um cateterismo. A sua estrutura constituída por uma malhas fabricadas na liga NiTi, permite manter a forma dos vasos evitando o colapso dos mesmos e até alargar o seu diâmetro em caso de obstrução evitando assim embolias [2].

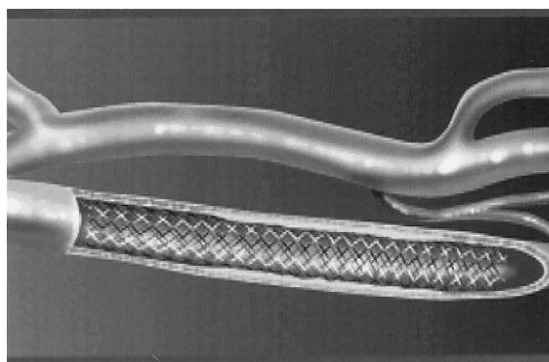


Figura 2.13 Visualização de um stent num vaso sanguíneo [2]

2.4.4 Robótica

Desde a década de 1980 que as ligas com memória de forma têm sido bastante utilizadas em diversos sistemas robóticos, sobretudo como micro actuadores ou músculos artificiais. Os principais desafios para a robótica neste momento são aumentar a performance enquanto diminuem a escala dos seus componentes tornando o sistema mais inteligente ao mesmo tempo que aumenta a sua utilidade e precisão (mais compacto, mais rápido, mais fiável e mais autónomo) [18].

Um novo sistema de ligas com memória de forma para uma mão prótica foi apresentado por Chee Siong em que dois actuadores NiTi são utilizados para mexer os dedos robóticos em vez de utilizar os sistemas convencionais de molas, que são mais complexos e mais susceptíveis a falhas e fadiga. O sistema pode ser observado na Figura 2.14.

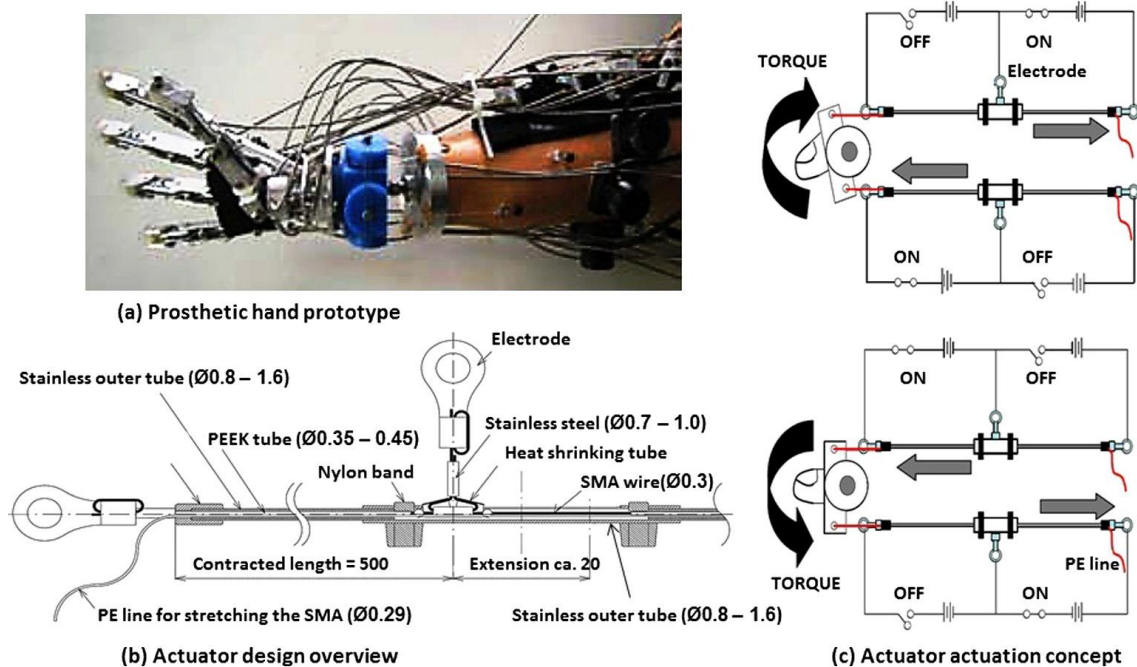


Figura 2.14 Mão robótica actuada por NiTi SMA [18]

Outro exemplo é um aparelho de reabilitação de movimento para as mãos utilizando actuadores de molas de liga NiTi. O desenvolvimento foi acompanhado por especialistas de diversas áreas, desde a robótica à engenharia biomédica passando pela medicina e fisioterapia. Foi estudada a forma como os fisioterapeutas e médicos executavam os movimentos de reabilitação nos doentes de forma a progressivamente poderem recuperar a mobilidade perdida das suas mãos. A partir daí o desafio era replicar esses movimentos com a velocidade, precisão e amplitudes correctas para que o doente pudesse executar essa reabilitação de forma mais autónoma não ficando dependente de acompanhamento de um especialista. A melhor solução encontrada foi a utilização de actuadores de liga NiTi pois apresentavam um bom controlo de velocidade e amplitude de movimento através de

um sistema muito mais simples e menos dispendioso do que um sistema semelhante, por exemplo hidráulico [19].

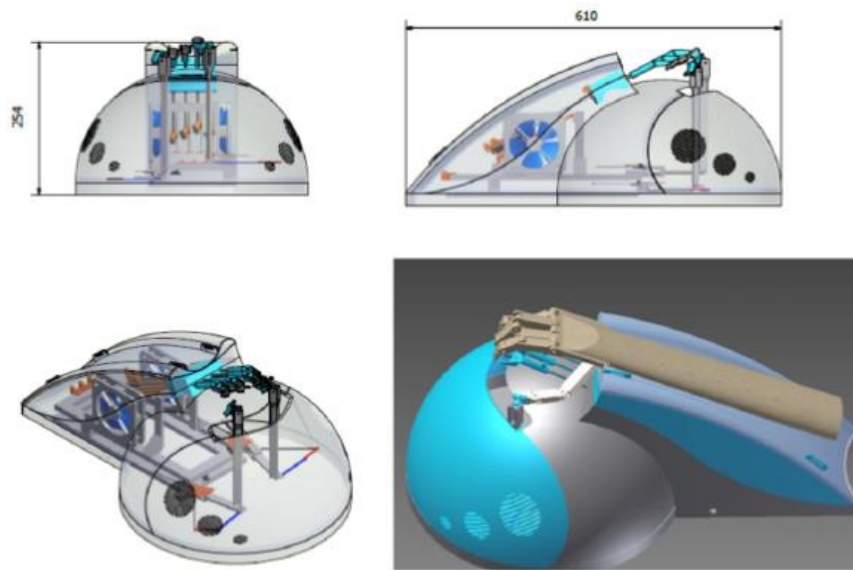


Figura 2.15 Protótipo do produto funcional [19]

2.5 FURAÇÃO

Na revisão bibliográfica realizada sobre a maquinagem das ligas com memória de forma, percebeu-se que na literatura a informação sobre a furação da liga NiTi era escassa. Nesse sentido decidiu-se abordar a furação como processo de maquinagem nas mesmas ligas.

A furação é uma operação de maquinagem para a obtenção de furos cilíndricos numa peça com o auxílio de uma ferramenta de corte, onde o movimento de avanço é realizado segundo uma directriz que coincide com o eixo de rotação [20]. Este é considerado um dos processos de maquinagem mais utilizados na indústria quando se pretende realizar a ligação de conjuntos mecânicos [21].

Na operação de furação são utilizadas brocas que são de formato cilíndrico e constituídas por um ou mais canais rectos ou helicoidais, podendo ter um canal interno para a passagem do fluido de corte. Estas possuem na sua extremidade uma ponta cónica, afiada com ângulos de ponta mediante o material a ser furado.

Consoante o material a ser maquinado e características pretendidas na furação (exigências para a dimensão do furo, profundidade, de produtividade, controle da apara), o tipo de broca e geometria a ser seleccionados são fundamentais. Existem diferentes ferramentas de furação, mas para

este trabalho apenas se irão abordar as brocas helicoidais de haste cilíndrica, que são o tipo de brocas mais utilizado para a produção de furos a nível industrial [21].

De um modo simplista, uma broca helicoidal consiste num corpo cilíndrico, com uma haste e uma parte cortante. A parte cortante é composta por canais de escoamento da apara numa trajectória elíptica em torno do eixo da broca, e uma zona de corte, designada ponta da broca. A Figura 2.16 mostra as partes constituintes de uma broca helicoidal e complexidade geométrica da ponta da sua ponta. As brocas são classificadas de acordo com o seu diâmetro nominal, formato da haste, número de canais, ângulo de ponta e pelo tipo de material de que são fabricadas.

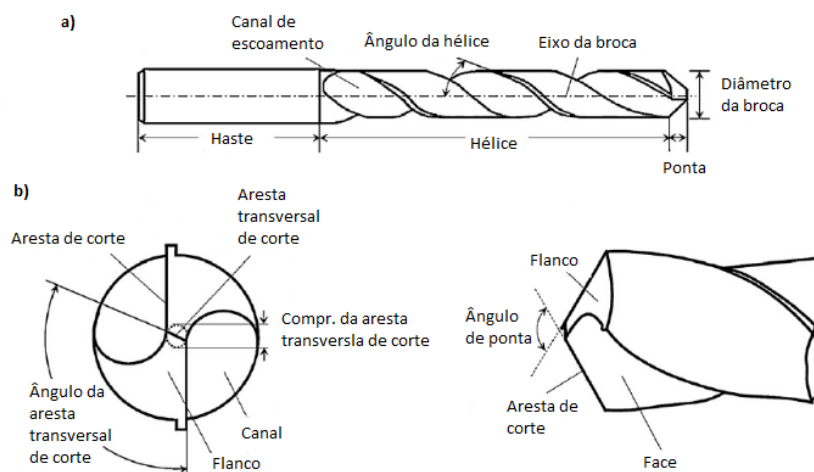


Figura 2.16 Geometria da broca: a) broca helicoidal; b) ponta da broca (Adaptado de [22])

Durante o processo de furação as ferramentas de corte estão sujeitas a altas temperaturas, altas pressões de contacto e atrito entre a ponta da broca e da superfície da peça a maquinar. Assim, na fabricação das ferramentas de corte para furação, são utilizados materiais com diferentes características que podem ser, entre outros, aço rápido (HSS) e metal duro (HM), com ou sem revestimento. O aço rápido é um aço ferramenta de alta liga que pode conter tungsténio, crómio, vanádio e molibdénio em quantidades químicas que podem variar segundo as propriedades desejadas na ferramenta. O metal duro, carboneto de tungsténio, é produzido por pulverometalurgia e apresenta elevada dureza e resistência ao desgaste e razoável tenacidade.

Numa operação de furação quer as condições de processo, as condições da ferramenta de corte e os parâmetros de furação, influenciam não só a tolerância exigida para o furo, mas também a qualidade do mesmo. Assim, podem ocorrer os seguintes erros geométricos:

- Erro de forma;
- Erro de posição;
- Erro de circularidade;

No corte por arranque de apra, a apra pode apresentar-se fundamentalmente sob três tipos: contínua regular, contínua irregular e descontínua. A alteração dos parâmetros de maquinagem numa operação de corte de um dado material pode determinar alteração do tipo de apra produzida. Assim, as aparas podem ser classificadas quanto à sua forma [22]:

- Apra lisa ou de fita, que ocupa muito espaço e dificulta a sua evacuação da zona de trabalho;
- Apra helicoidal, que ocupa um espaço muito menor que a anterior e é de evacuação fácil;
- Apra em espiral que é também uma forma conveniente;
- Apra em lascas, preferida quando houver um espaço reduzido disponível para a evacuação ou quando a sua remoção for forçada por acção de um fluido de corte, como é o caso da furação profunda.

1. Fita	2. Tubular	3. Espiral	4. Helicoidal em gume	5. Helicoidal cônica	6. Arco	7. Lasca	8. Agulha
1.1	2.1	3.1	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1
Longa	Longa	Plana	Longa	Longa	Ligada		
1.2	2.2	3.2	4.2	5.2	6.2		
Curta	Curta	Cônica	Curta	Curta	Fragmento		
1.3	2.3		4.3	5.3			
Enrolada	Enrolada		Enrolada	Enrolada			

Figura 2.17 Formas de apra segundo a norma ISO 3685 [22]

A energia específica de corte ajuda a encontrar parâmetros de corte vantajosos para a furação das ligas com memória de forma (NiTi) [23]. Assim, considerando que a broca tem duas arestas de corte, e aplicando-se em cada uma delas uma força de corte tangencial temos que:

$$k_s = \frac{8 M_z}{f d^2} \quad 2-1$$

Sendo M_z o binário, f o avanço e d o diâmetro da broca.

A potência consumida (P_e) é também um dos critérios comumente utilizado para avaliação da maquinabilidade e pode obter-se a partir dos ensaios experimentais, quando se medem as forças de corte e o binário.

$$P_e = 2\pi n M_z + v_f F_f \quad 2-2$$

No entanto, como a potência de avanço é significativamente mais pequena do que a potência de corte, considera-se normalmente apenas a potência de corte (P_c).

$$P_c = 2\pi n M_z \quad 2-3$$

2.6 FURAÇÃO DAS LIGAS NiTi

Este tópico incidirá nos estudos realizados para a caracterização do processo de furação das ligas NiTi com memória de forma através da operação de furação. Estas ligas têm sido investigadas através da realização de experiências de furação, onde é possível analisar os possíveis defeitos na superfície maquinada, estando estes directamente associados às características da peça a maquinar (por exemplo, material e tamanho do grão), parâmetros da ferramenta (ângulo de inclinação, raio de aresta, desgaste, revestimento, entre outros) e parâmetros de corte (velocidade de corte e velocidade de avanço).

Lin *et al.* [24] estudaram a maquinagem de NiTi através de dois processos convencionais, corte mecânico (esmeril) e por furação. Na realização da experiência utilizando a operação de furação foram usadas duas amostras da liga Nitinol com percentagens de Níquel e Titânio diferentes, Ni₅₀ - Ti₅₀ e Ni₅₁ - Ti₄₉. Foram usadas três diferentes brocas helicoidais, designadamente broca de aço rápido (HSS), broca de aço rápido revestida de nitreto de Titânio (HSS + TiN) e broca de Carboneto de Tungsténio (WC). Após a experiência, na tentativa de conseguir furar a máxima profundidade possível em ambas as amostras, concluíram que a liga Ni₅₀ - Ti₅₀ apresenta melhor características para maquinar que a liga Ni₅₁ - Ti₄₉. As ferramentas de HSS + TiN apresentam uma furação de maior capacidade (profundidade máxima = 22.943 mm) do que as brocas helicoidais HSS (11.799 mm), devido à alta dureza e excelente resistência ao desgaste do nitreto de Titânio (TiN). Contudo, a que apresenta melhor capacidade é a broca helicoidal de WC, profundidade máxima de 39.596 mm. Quanto aos parâmetros de corte, os valores óptimos obtidos foram: velocidade de rotação de 163 rpm e um avanço de 0.07 mm/rot.

Weinert *et al.* [23] também realizaram um estudo sobre a furação nas ligas Nitinol usando duas ligas de NiTi SMA com temperaturas de transformações de fases diferentes. Ambas apresentavam uma percentagem atómica de Níquel e de Titânio semelhante (cerca de 50 %), mas

uma liga apresentava fase austenítica e uma outra com fase martensítica à temperatura ambiente. A profundidade de furação em estudo foi de 5 mm, porém na realização do estudo do desgaste da ferramenta o valor da profundidade foi de 15 mm. Ao efectuar-se este estudo com o auxílio de duas brocas de metal duro com revestimentos de TiCN/TiN e diâmetro de 5 mm, concluiu-se que ambas são adequadas para a maquinagem das ligas NiTi e que a broca com um núcleo dúctil e revestimento duro, apresenta melhores resultados em comparação com uma broca com carboneto cementado homogeneamente. Para haver menor desgaste da ferramenta e melhor qualidade na superfície maquinada, os parâmetros favoráveis de maquinagem são uma velocidade de corte 30 m/min (≈ 1910 rpm) e uma profundidade de corte de 0.07 mm/rot. Segundo este estudo, na maquinagem é indiferente as transformações de fase das ligas, pois não influencia se a liga é austenítica ou martensítica à temperatura ambiente.

2.7 SÍNTESE

A revisão bibliográfica realizada e apresentada anteriormente serve de apoio para a realização do trabalho experimental que irá ser apresentado a seguir. A selecção das variáveis de maquinagem no trabalho experimental como as ferramentas de corte, parâmetros de corte e condições de furação (a seco, emulsão e criogenia) foram baseadas na revisão bibliográfica realizada. É ainda de salientar que a escolha do material a maquinar foi realizada feita segundo Weinert *et al.* [23], que concluiu que na maquinagem é indiferente a maquinagem de ligas em estado austenítico ou martensítico à temperatura ambiente.

Metodologias e Procedimento Experimental

Neste capítulo abordam-se as metodologias utilizadas para a realização deste trabalho de modo a atingir os objectivos previamente definidos. Inicialmente serão descritos os materiais dos provetes, brocas, parâmetros de corte utilizados e tipos de refrigeração na maquinagem. Serão ainda abordados os equipamentos utilizados na operação de furação e instrumentos de aquisição de dados. Por último, será apresentado o planeamento e realização do desenho de experiências e as respectivas técnicas usadas para avaliação da experiência realizada.

3.1 MATERIAIS E FERRAMENTAS UTILIZADOS

Neste trabalho os ensaios de furação foram realizados em duas diferentes ligas de NiTi para se poder estudar a influência dos parâmetros em ligas com diferentes percentagens atómicas de Níquel e Titânio. As ligas, ambas austeníticas, fornecidas pelo CENIMAT, foram seleccionadas segundo as suas propriedades, uma com percentagem atómica de Níquel de 50.8 % e outra com percentagem atómica de Níquel de 51.0 %. As respectivas propriedades físicas e mecânicas são apresentadas na Tabela 3.1 e Tabela 3.2. Estas foram designadas da seguinte forma consoante a percentagem atómica de Níquel:

❖ NiTi-2 \Rightarrow 50,8 at. % Ni

❖ NiTi-3 \Rightarrow 51.0 at. % Ni

Devido às diferentes geometrias rectangulares das placas de NiTi, foi necessário cortar as placas para se obterem provetes idênticos. O corte das placas de NiTi foi realizado numa máquina de corte com jacto de água, técnica eficaz usada para o corte de ligas com memória de forma [25]. Esta tecnologia tem a vantagem de reduzir os danos térmicos nas peças, prevenindo o aumento de temperatura no corte. Obtiveram-se 4 provetes de cada placa com as seguintes dimensões (Comprimento x Largura x Espessura):

- Provetes NiTi-2: 88.75x11.00x2.00 mm
- Provetes NiTi-3: 103.00x11.00x3.00 mm

Tabela 3.1 Propriedades físicas das ligas NiTi usadas na experiência

Propriedades físicas das ligas NiTi						
	Ponto de fusão	Massa Volúmica	Calor específico	Coeficiente expansão térmica		Condutividade Térmica
				Martensite	Austenite	Martensite Austenite
	[°C]	[kg/dm ³]	[J/kg·K]	[×10 ⁻⁶ K ⁻¹]		[W/m·K]
NiTi	1300	6.45	322	6.6	11	8.6 18

Tabela 3.2 Propriedades mecânicas das ligas NiTi usadas na experiência

	Módulo de Young		Tensão de Ruptura		Coeficiente de Poisson
	Martensite	Austenite	Encruamento	Recozimento	
	[GPa]		[MPa]		-
NiTi	70-83	28-41	1900	895	0.33

Para a realização dos ensaios foram utilizadas brocas helicoidais com 3 mm de diâmetro. Foram escolhidos dois tipos de material para avaliação da sua aptidão neste tipo de ligas. Assim, escolheram-se ferramentas de corte de aço rápido e metal duro, ilustradas na Figura 3.1.

As características das brocas seleccionadas são apresentadas na Tabela 3.3. Ambas são brocas de série extra curta da *DORMER*, reduzindo assim as vibrações quando utilizadas na maquinagem de alta velocidade.

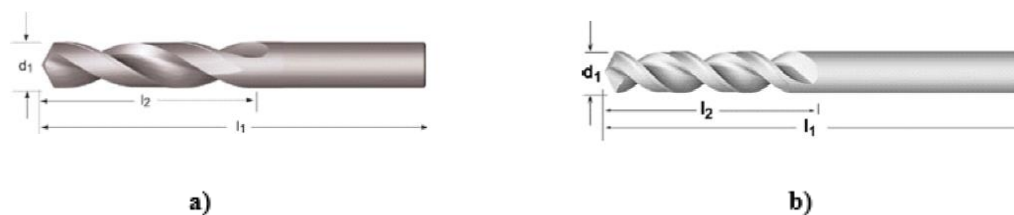


Figura 3.1 Brocas helicoidais: a) Broca de metal duro, DORMER R120; b) Broca de aço rápido, DORMER A920. [26]

Tabela 3.3 Características das brocas utilizadas na operação de furação (Adaptado de [26])

Brocas	Material	Norma	Diâmetro, d_1 (mm)	Comprimento de corte, l_2 (mm)	Comprimento broca, l_1	Ângulo de ponta ($^\circ$)
R120	Metal duro	DIN 6539	3.0	16.0	46.0	120
A920	Aço rápido cobalto	DIN ANSI	3.0	16.0	46.0	130

3.2 CONDIÇÕES DE MAQUINAGEM

No processo de maquinagem é usual utilizar-se refrigerantes e/ou lubrificantes para diminuir as elevadas temperaturas de maquinagem, com o objectivo de facilitar a operação e diminuir o desgaste das ferramentas [27]. Neste estudo, com intuito de diminuir a temperatura na zona de corte da liga NiTi, a furação foi realizada sob duas diferentes condições: com emulsão e em condições criogénicas. O processo foi ainda realizado a seco para efeitos de comparação de resultados. A maquinagem a seco foi realizada à temperatura ambiente.

O óleo de corte solúvel utilizado foi o GALP Solcut, com uma concentração recomendada de 7% [28].

A refrigeração por criogenia tem sido demonstrada em vários estudos realizados como sendo uma técnica promissora na melhoria da maquinagem [29]. Assim, neste estudo foi utilizado azoto líquido para reduzir a temperatura durante a furação. Nas condições de criogenia a maquinagem dos provetes foi realizada num recipiente, garantindo que o provete quando maquinado estava submerso

em azoto líquido, como representado na Figura 3.2. O recipiente, em acrílico, foi concebido e produzido no Laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI.

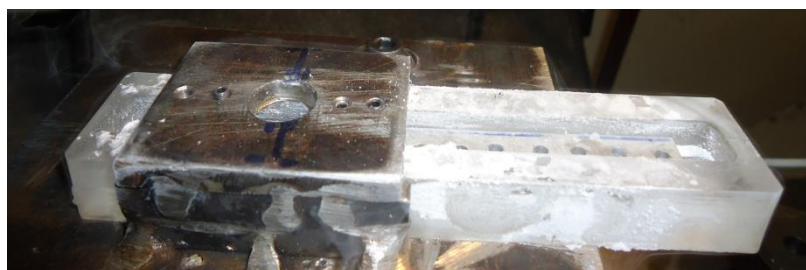
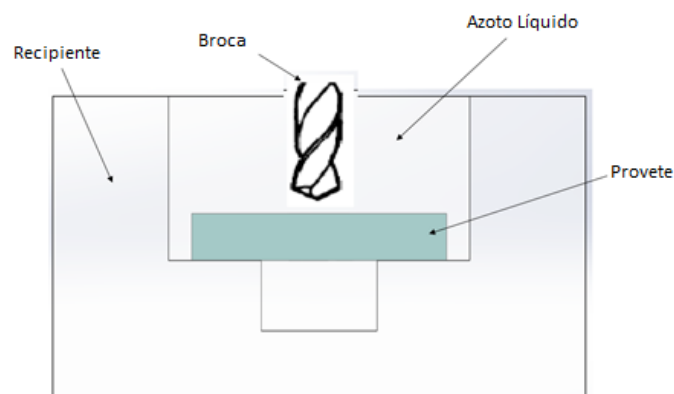


Figura 3.2 Furação com criogenia

Foi ainda produzida uma caixa, através da impressão 3D, que permite a recolha das aparas durante o processo de furação para posterior análise. A geometria e dimensões da caixa foram projectadas e adequadas segundo as necessidades.

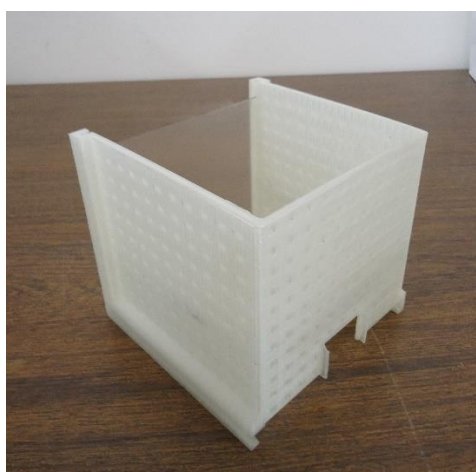


Figura 3.3 Caixa produzida para retenção das aparas

3.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA FURAÇÃO

Para a realização deste trabalho realizou-se um conjunto de ensaios de furação no centro de maquinagem vertical LEADWELL VMC-15 (Figura 3.4a) disponível no laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI da FCT-UNL. Através deste controlo numérico computadorizado (CNC) permite:

- Maior precisão na execução dos ensaios, estabelecendo uma velocidade constante para o avanço axial da broca;
- Alinhamento preciso entre os eixos da broca e do sensor de aquisição de dados.



a)



b)

Figura 3.4 a) Centro de maquinagem CNC; b) Cabeça de alta velocidade

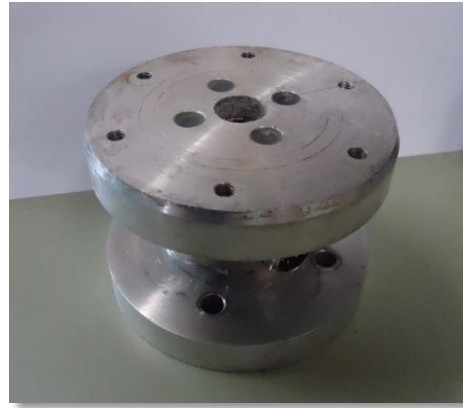
Devido à limitação da velocidade de rotação deste equipamento (6 000 rpm), foi necessário adaptar uma cabeça de alta velocidade para a concretização da gama de valores de velocidade de rotação. Foi usada uma cabeça de alta velocidade Nikken BT30-NX5-153 (Figura 3.4b) que permite uma rotação máxima 20 000 rpm.

A aquisição de dados na realização dos ensaios foi realizada através de dois sensores distintos, um para aquisição da força axial, outro para o binário. Assim, para medição da força axial utilizou-se um dinamómetro Kistler 9257 B (Figura 3.5a) ligado a um amplificador de carga multicanal Kistler 5070 (Figura 3.5b). Os valores do binário são adquiridos através de um sensor de binário desenvolvido previamente no DEMI, dimensionado para um valor máximo na ordem dos 30 Nm (Figura 3.5c). A conversão de sinal analógico para sinal digital foi realizada através de um sistema de aquisição de dados (Figura 3.5d). O ambiente gráfico de programação do *software LabView* foi utilizado para processar o sinal obtido e reportar os resultados, nomeadamente para controlar e armazenar os dados experimentais. O programa desenvolvido neste *software* permite uma visualização gráfica da força de avanço e binários medidos pelos sensores. Esses dados são

armazenados como um arquivo de texto ASCII e posteriormente processados e analisados utilizando o *software MATLAB*.



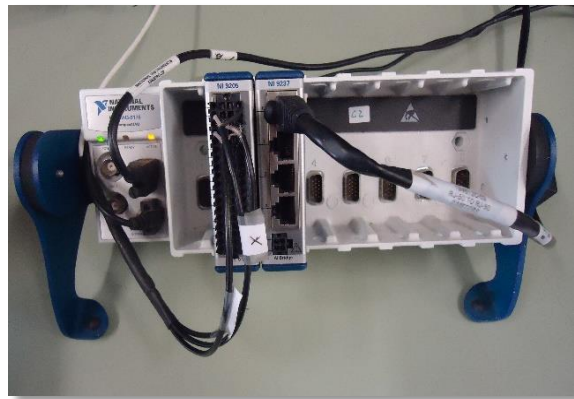
a)



c)



b)



d)

Figura 3.5 a) Dinamómetro Kistler; b) Carga multicanal Kistler; c) Sensor de binário; d) Sistema de aquisição de dados.

3.4 DESENHO DE EXPERIÊNCIAS E METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Um processo produtivo é essencialmente um sistema onde as entradas (*inputs*) são transformadas em saídas (*outputs*), tal como representado na Figura 3.6. As entradas podem ser factores controláveis (velocidade de corte, velocidade de avanço) ou não controláveis (condições ambientais, matéria-prima com grande variabilidade) e as saídas, designadas por respostas, são as características da qualidade [30].

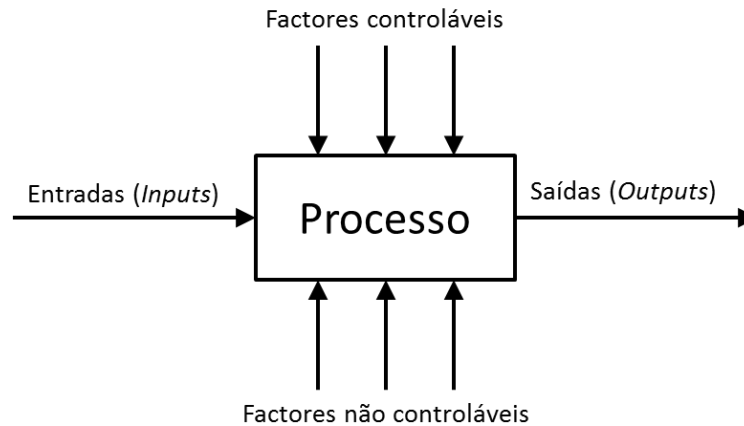


Figura 3.6: Representação esquemática de um processo

A pouca disponibilidade de material, essencialmente devido ao elevado custo da liga NiTi, é limitativa quando se pretende realizar investigação baseada em trabalho experimental. Assim, torna-se essencial a minimização do número de experiências necessárias para o estudo das respostas pretendidas. Desta forma, e para concretizar esta minimização do número de ensaios necessários neste trabalho, foi utilizado o Desenho de Experiências (*Design of Experiments*) associado à Metodologia de Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology*).

O Desenho de Experiências é o planeamento de uma série de testes no qual se efectuem alterações intencionais de alguns parâmetros do processo (factores) para observar os efeitos que ocorrem numa ou mais características da unidade experimental (entidade na qual são feitas as medições de uma ou mais características) e identificar as respectivas causas. Os valores que os factores assumem designam-se por níveis, podendo estes ser qualitativos ou quantitativos. Este método estatístico permite determinar quais são os factores controláveis que afectam determinadas características da qualidade e quais os melhores níveis desses factores de forma a aumentar a resistência do produto aos factores não controláveis ou de ruído, satisfazendo assim os requisitos de desempenho. A replicação é a repetição de uma experiência ou ensaio sob condições análogas sendo importante na realização do desenho de experiências porque permite obter uma estimativa do erro experimental e uma estimativa mais eficiente dos efeitos dos factores.

Nesta dissertação pretende-se estudar os efeitos dos parâmetros de corte no processo de furação de ligas Níquel Titânio. Considerando os dois parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço), o desenho de experiências será realizado com estes dois factores que são controláveis, através de um planeamento composto central do tipo circunscrito, e serão observados os efeitos destes nas respostas quando os factores mudarem de nível [30]. O planeamento composto central circunscrito é a forma original do planeamento composto central, no qual os pontos estrela estão a

uma distância do centro baseada nas propriedades desejadas para o planeamento e no número de factores. Este tipo de planeamento possui simetria circular e requer 5 níveis para cada factor.

Os planeamentos experimentais e respectivas concretizações não têm de ser complexos para serem bem-sucedidos. Pelo contrário, desenhos de experiências simples, mas bem planeados e executados conduzem a conclusões mais importantes e por vezes surpreendentes.

A Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) é um conjunto de técnicas criadas para encontrar o melhor valor da resposta. Se descobrir o melhor valor ou valores de resposta está além dos recursos disponíveis da experiência, então os métodos de resposta de superfície são usados para pelo menos ganhar um maior conhecimento do sistema de resposta no geral. Estas técnicas consistem no planeamento da experiência e na análise subsequente dos dados experimentais. Na maioria dos casos, o comportamento da resposta medida é governada por certas leis que podem ser factores experimentais, e assim deverá ser possível determinar as melhores condições (níveis) dos factores para otimizar um desejado output. Normalmente esta relação é muito complexa ou desconhecida e é necessário uma aproximação empírica. A estratégia utilizada nessa tal aproximação é a base do RSM [31].

Segundo Montgomery [34], as equações definidas de superfície de resposta podem ser representadas graficamente e utilizadas de três formas:

- Descrever como as variáveis em teste afectam as respostas;
- Determinar as inter-relações entre as variáveis em teste;
- Para descrever efeitos combinados de todas as variáveis em teste sobre a resposta.

No entanto, esta metodologia apresenta algumas limitações que devem ser consideradas quando se pretende realizar um estudo de um processo de maquinaria. A limitação mais relevante prende-se com o facto de, por se estar a utilizar uma análise estatística, ser absolutamente necessário utilizar adequadamente o conhecimento sobre o processo para chegar a conclusões apropriadas acerca dos resultados obtidos. Por outro lado, se os factores não forem especificados correctamente, ou se existir grande variação dos factores, as conclusões podem ser comprometidas.

Após a realização dos ensaios deve utilizar-se a análise de variância para o tratamento dos resultados obtidos. Esta análise permite determinar de forma objectiva quais os factores e/ou interações que afectam significativamente as respostas, através do valor de adequabilidade do modelo, R^2 . Posteriormente é possível determinar a combinação de níveis que conduz à optimização. Segundo Pereira e Requeijo [30], a análise da variância (ANOVA) é uma técnica estatística que permite proceder à comparação entre parâmetros de duas ou mais populações. Esta análise possibilita a repartição da variabilidade total dos dados experimentais pelas diversas componentes causadoras

da variabilidade, sendo assim possível determinar que componentes são estatisticamente significativas.

No contexto deste trabalho, será utilizada a Metodologia de Superfície de Resposta por se procurar a compreensão do sistema global de resposta, através da quantificação da relação entre os valores das variáveis de resposta e os valores do conjunto de factores experimentais que se presume afectarem a resposta. Uma vez que se pretende utilizar esta metodologia, o planeamento de experiências deverá ser orientado para tal. O conjunto de ensaios a realizar deverá permitir estimar as interações e os efeitos quadráticos dos factores e fornecer uma ideia da forma da superfície de resposta a ser investigada. Este tipo de planeamento é habitualmente utilizado para:

- Encontrar as melhores configurações do processo;
- Solucionar problemas ou fragilidades do processo;
- Tornar o processo mais robusto às influências externas e não controláveis.

Um planeamento composto central contém um planeamento factorial fraccional embutido com pontos centrais que são aumentados com um grupo de pontos que permitem estimar a curvatura. Um planeamento composto central do tipo circunscrito é a forma original de um planeamento composto e explora um maior domínio das variáveis comparativamente com os outros tipos. Existem pontos a uma distância α do centro que estabelecem novos extremos para uma configuração baixa e alta em todos os factores. O valor de α depende de certas propriedades desejadas para o planeamento e do número de factores envolvidos.

Uma vez que se trata de um processo industrial, a melhor aproximação será realizada através da utilização de um modelo quadrático que utiliza um polinómio de segundo grau para representar matematicamente a função da superfície de resposta (equação 33)), onde x_i e x_j são as variáveis de controlo (representam os níveis de cada factor); β_0 , β_i , β_{ii} e β_{ij} os coeficientes do polinómio (obtidos por regressão), k representa o número de factores considerados para a experiência e ϵ o erro [32].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad 3-1$$

O número de coeficientes $n\beta$ pode ser calculado através da equação 3- [33].

$$n\beta = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad 3-2$$

O planeamento composto central do tipo circunscrito é a forma mais comum para ajuste deste modelo e consiste num planeamento factorial $2k$, onde são adicionadas $2k$ experiências axiais

e n_c experiências centrais. Assim, o número total de experiências é dado pela equação 35) [33], na qual:

- $n_f = 2k$ pontos de um planeamento factorial completo, correspondentes aos vários vértices de um cubo k -dimensional $(x_1, x_2, \dots, x_k) = (\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1)$;
- $2k$ pontos correspondentes aos vértices de uma estrela k -dimensional, centrada no cubo anterior, designados por pontos estrela $(\pm \alpha, 0, \dots, 0), (0, \pm \alpha, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, \pm \alpha)$;
- $n_c \geq 1$ pontos centrais $(x_1, x_2, \dots, x_k) = (0, 0, \dots, 0)$;

$$N = n_f + 2k + n_c \quad 3-3$$

Na Figura 3.7 está representado um exemplo de um planeamento composto central circunscrito no qual a área do círculo representa o domínio das variáveis, os pontos vermelhos representam os dois factores a três níveis $(-1, 0, 1)$ e os pontos verdes os novos extremos α $(-\alpha, -1, 0, 1, +\alpha)$. Para determinar α no caso de um planeamento factorial completo utiliza-se a equação 36), sendo k o número de factores. Como no caso a estudar são 2 factores (pós-pressão e tempo de pós-pressão), então $|\alpha| = 1,41$ [34].

$$\alpha = [2^k]^{\frac{1}{4}} \quad 3-4$$

Na Tabela 3.4 encontram-se os valores dos parâmetros de corte que serão utilizados no desenho de experiências. Para atribuição dos valores das variáveis correspondentes a cada um dos níveis foi considerado o domínio das duas variáveis pretendido para análise neste trabalho. Os valores altos e baixos de cada factor foram seleccionados segundo a literatura de estudos de maquinaria nas ligas com memória de forma.

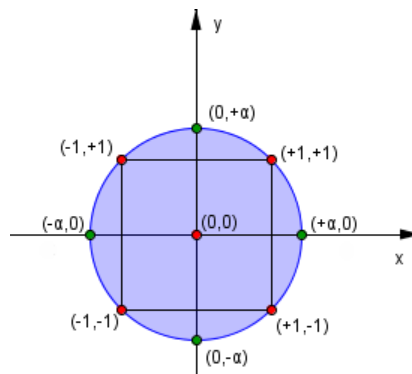


Figura 3.7 Planeamento composto central do tipo circunscrito com coordenadas dos pontos

Tabela 3.4 Atribuição dos valores das variáveis

DoE		Níveis				
		$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
Factores de maquinagem	Velocidade de corte (v)	5.0	16.0	42.5	69.0	80.0
	Velocidade de avanço (f)	0.05	0.06	0.08	0.09	0.1

No total são 10 as experiências a realizar para a furação com emulsão e com criogenia, sendo que para a furação a seco apenas é realizado o ponto central do planeamento, para comparação.

Tabela 3.5: Planeamento DoE

Ensaio (furação)			Factores			
Seco	Emulsão	Criogenia	v	v (m/min)	f	f (mm/rot)
-	E1	C1	-1	16.0	-1	0.06
-	E2	C2	-1	16.0	1	0.09
-	E3	C3	1	69.0	-1	0.06
-	E4	C4	1	69.0	1	0.09
-	E5	C5	-1.414	5.0	0	0.08
-	E6	C6	1.414	80.0	0	0.08
-	E7	C7	0	42.5	-1.414	0.05
-	E8	C8	0	42.5	1.414	0.1
S1	E9	C9	0	42.5	0	0.08
-	E10	C10	0	42.5	0	0.08

3.5 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

3.5.1 Difracção por Raio-X

A difracção por raio-x (DRX) é uma ferramenta de investigação para obter informação sobre a estrutura, composição e estado de materiais policristalinos. Algumas aplicações típicas são a identificação de picos cristalinos, tensões residuais, tamanho de cristalites e orientação preferencial dos grãos do material analisado [35].

O princípio consiste em um feixe de raios-X monocromáticos estar direccionado a um material cristalino, observando-se a reflexão ou a difracção de raios-X em vários ângulos em relação

ao feixe primário (ver Figura 3.8). A relação entre o comprimento de onda de feixe de raio-X, λ , e o ângulo de difracção, 2θ , e a distância entre cada conjunto de planos atómicos da rede cristalina, d , é dado pela conhecida lei de Bragg, equação (3.7), onde n representa a ordem de difracção. Através desta fórmula é possível calcular a distância interplanar da estrutura cristalina do material a ser estudado. O espaçamento interplanar depende apenas da dimensão da célula unitária de cristal, enquanto as intensidades dos raios difractados são uma função do posicionamento dos átomos na célula unitária [35].

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

3-5

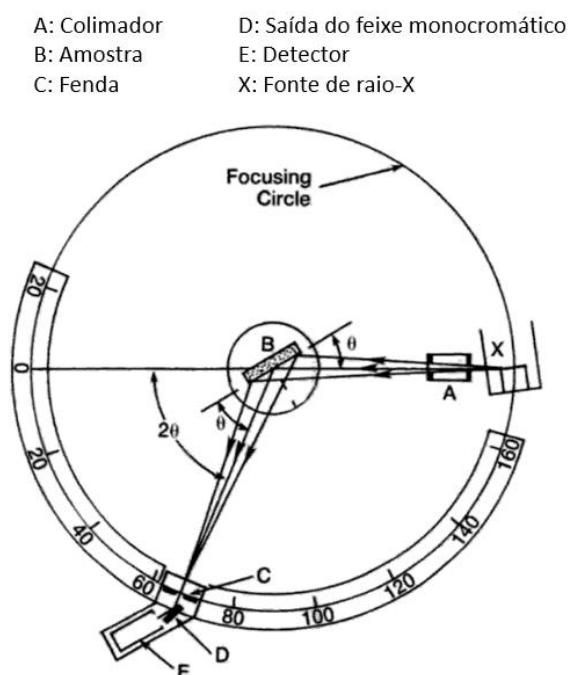


Figura 3.8 Esquema de um difractómetro de raio-X (Adaptado de [35])

A análise do material de um dos provetes (NiTi-1) e das respectivas aparas, foram realizadas nas instalações DESY (HEMS- *High Energy Materials Science beamline*), em Petra III em Hamburgo, Alemanha. Foi utilizado um comprimento de onda de 0.1426 \AA (87 keV), e os testes foram realizados à temperatura ambiente ($21 \text{ }^{\circ}\text{C}$). A Figura 3.9 representa o esquema da medição de uma apara por raio-X, onde o “início da apara” é parte inicial do furo e o “fim da apara” é a parte final do furo. Os scans foram realizados do “início da apara” para o “fim da apara”, onde o feixe de raio-X está fixo e o suporte com a apara movimenta-se seguindo da seta (baixo para cima). O tempo de exposição foi entre 5 a 10 segundos por cada scan realizado.

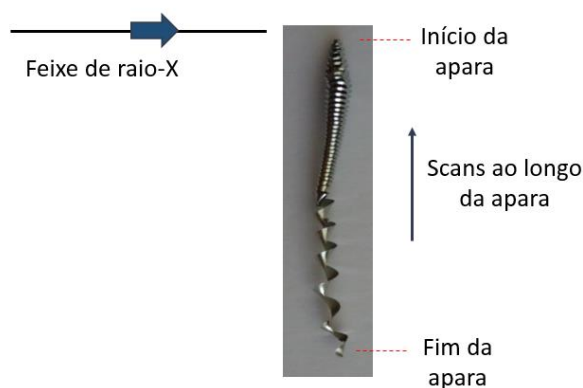


Figura 3.9 Esquema usado na medição de raio-X de uma avara

3.5.2 Calorímetro diferencial de varrimento

A calorimetria diferencial de varrimento (DSC) é uma técnica de análise térmica em que mede a energia calorífica absorvida ou libertada durante o aquecimento ou arrefecimento de uma substância em relação a uma amostra de referência, a uma velocidade constante [36].

O equipamento usado foi o *DSC 204 F1 Phoenix*, modelo da *Netzsch* que se encontra no CENIMAT. O DSC foi usado para caracterizar as temperaturas de transformação estrutural das ligas maquinadas e também as aparas dos furos nos provetes para posteriori comparar as temperaturas de transformação do material base e das aparas. Cada amostra foi submetida a um ciclo térmico entre $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, a uma velocidade constante de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, onde foi usado azoto líquido para o arrefecimento da amostra.

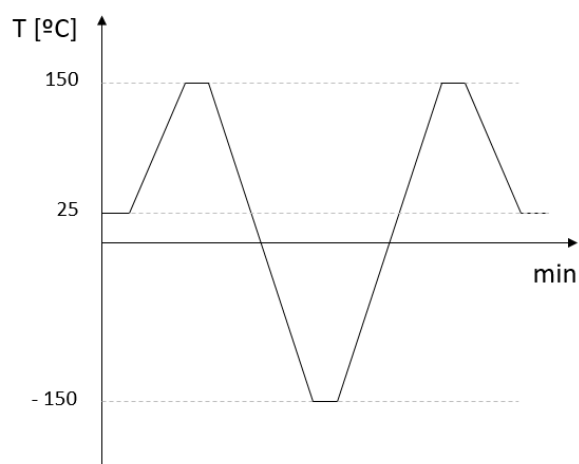


Figura 3.10 Ciclo térmico do programa DSC

Cada amostra é constituída pela parte inicial ou final da avara, com um peso na ordem dos 5.0 mg.

3.6 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE IMAGEM

A visualização de defeitos geométricos nos provetes furados, como é o caso da ovalização dos furos, foi efectuada usando técnicas de ensaios não destrutivos, nomeadamente inspecção visual e radiografia digital. Para análise do defeito recorreu-se a tratamento de imagem de modo a obter o valor da ovalização de cada furo.

A ovalização é um parâmetro que está relacionado com qualquer cónica, e mede o desvio em relação à circunferência. Assim a ovalização de uma circunferência é igual a 0 e igual a 1 para uma parábola.

$$Ex = \sqrt{1 - \left(\frac{R_{min}}{R_{max}}\right)^2} \quad 3-6$$

Os provetes foram radiografados perpendicularmente à fonte de radiação usando sistema de raio X Trophy 94 Vincennes associado a um sistema digital de aquisição de imagem Kodak RVG 5100. Uma caixa de chumbo devidamente projectada serve como dispositivo de blindagem. Estes equipamentos encontram-se disponíveis no laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI.

Foram feitos vários ensaios com vários tempos de exposição e diferentes distâncias focais e concluiu-se que as condições ideais para este caso seriam um tempo de exposição de 0.5 s e distância focal de 30 a 40 mm, o que é aceitável para o dispositivo usado sem riscos de ocorrência de zonas de penumbra.

Como resultado do processo obtiveram-se as imagens que serviram para a posterior medição da ovalização. Estas foram guardadas em formato TIFF (*Tagged Image File Format*) de alta resolução (1200×1600 pixels) e seguidamente processadas de modo a caracterizar as regiões de interesse. O processamento de imagem teve como objectivo obter quantitativamente a medição dos diâmetros de modo a calcular a ovalização. Estes valores foram conseguidos usando um algoritmo desenvolvido com as ferramentas de imagem do Matlab e adaptado para este trabalho.

Apresentação e Discussão de Resultados

Os resultados obtidos na componente experimental da presente dissertação serão apresentados e discutidos neste capítulo. Inicialmente será analisado o processo de furação dos provetes de NiTi, nomeadamente o efeito dos parâmetros de corte e a qualidade dos furos obtidos para o qual se procedeu ao estudo da geometria. Posteriormente será realizada a análise das aparas dos respectivos furos para a caracterização do material após a furação.

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Durante o trabalho realizado na furação dos provetes das ligas NiTi com as brocas de aço rápido, nem sempre foi exequível a realização do furo com os parâmetros seleccionados do DoE.

Numa primeira fase procedeu-se à inspecção visual dos furos realizados. Tendo em conta que foram utilizados, como variáveis, o material das ferramentas, o material dos provetes e as condições de corte, obteve-se no total 8 provetes, como representado na Figura 4.1.

A Figura 4.2 mostra os provetes de liga NiTi-2, após a realização dos furos de acordo do planeamento. Os provetes P1 (Figura 4.2a) e P2 (Figura 4.2b) são referentes à furação realizada em condições de emulsão e a seco utilizando respectivamente, brocas de HSS-E e HM. As restantes imagens são referentes à furação em condições de criogenia. A Figura 4.2c ilustra o provete P3 no qual foram utilizadas ferramentas de HSS-E e a Figura 4.2d o provete P4 onde se utilizaram brocas de HM. De forma análoga a Figura 4.3 representa os provetes de liga NiTi-3.

O procedimento experimental iniciou-se com a furação em condições de emulsão e a seco utilizando ferramentas de HSS-E. Verificou-se não ser possível a realização dos furos com determinados parâmetros, por fractura ou fusão da ferramenta quando em contacto com o material. Por esta razão, optou-se pela realização não aleatória das experiências e procedeu-se à furação nas condições em que os parâmetros de corte apresentavam os valores mais baixos. Assim, foi possível verificar a partir de que ensaio não era possível realizar o furo, pelo que não foram feitas as experiências seguintes. Quando se averiguava que não era executável não eram efectuados mais furos, pois estaríamos a desperdiçar material e brocas.

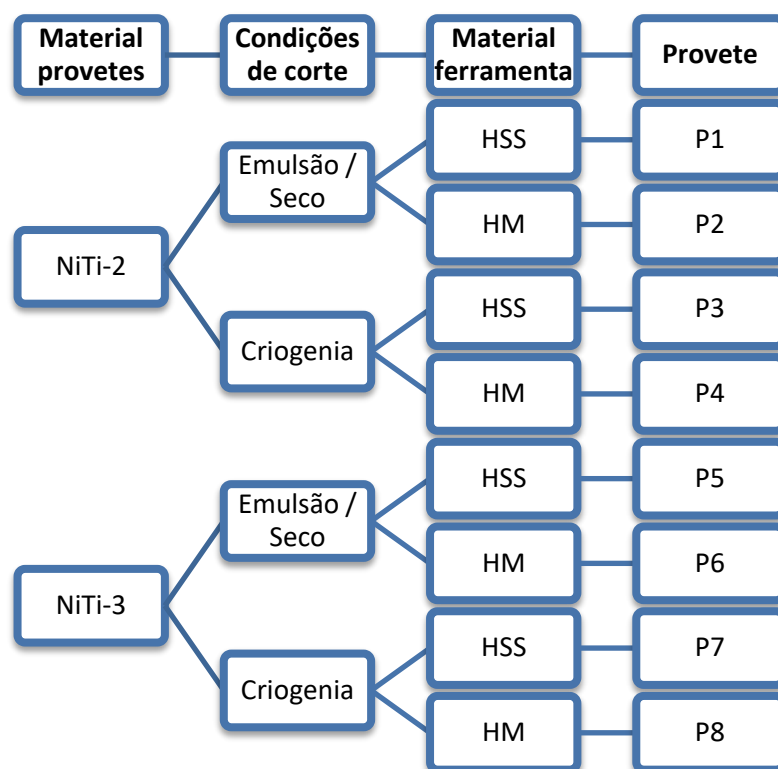


Figura 4.1 Esquema das experiências realizadas

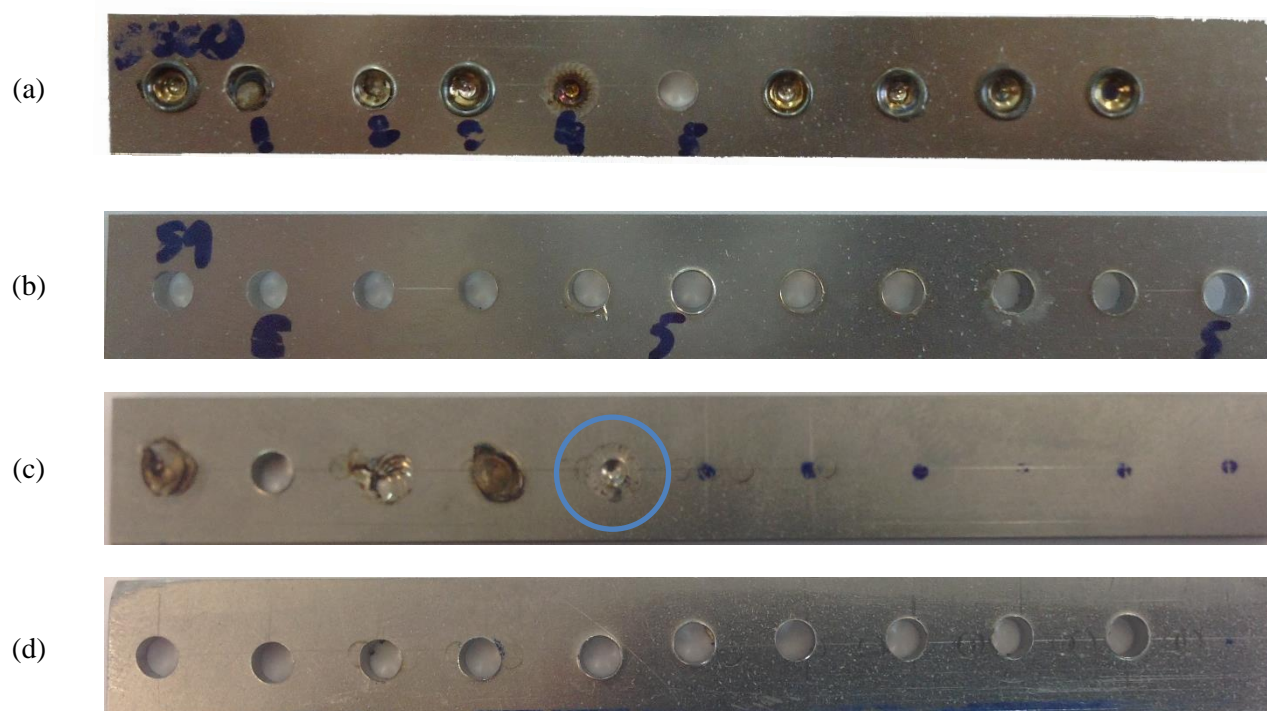


Figura 4.2 Provetes depois maquinados da liga NiTi-2: (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4

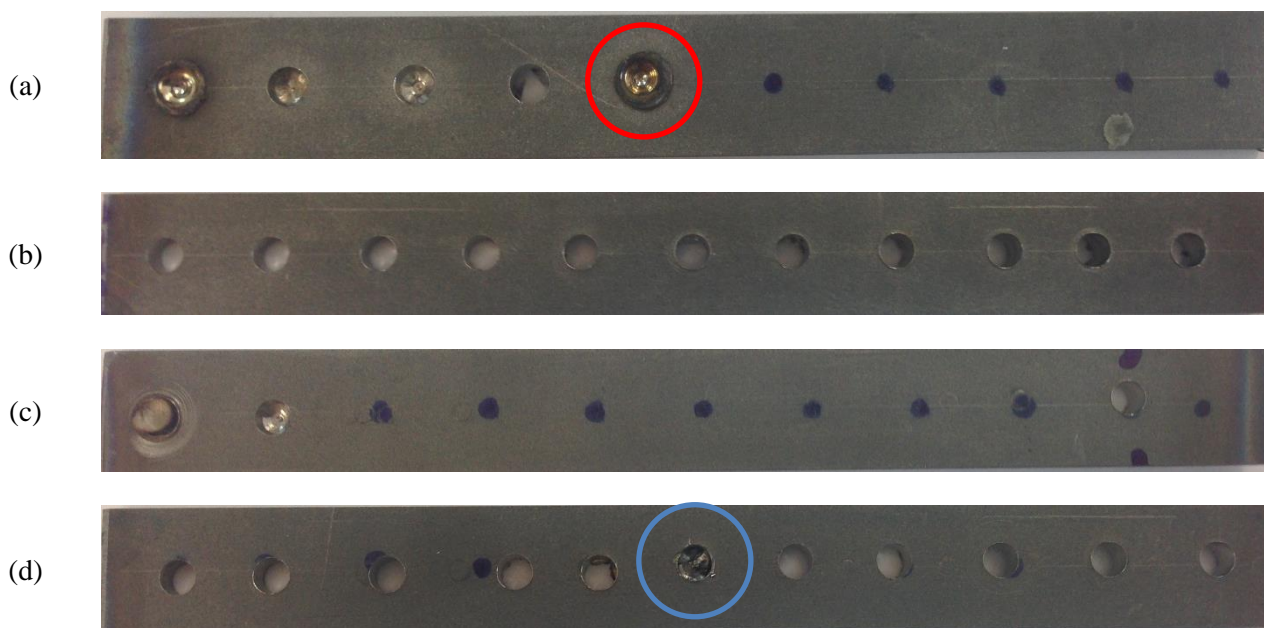


Figura 4.3 Provetes depois maquinados da liga NiTi-3: (a) P5; (b) P6; (c) P7; (d) P8

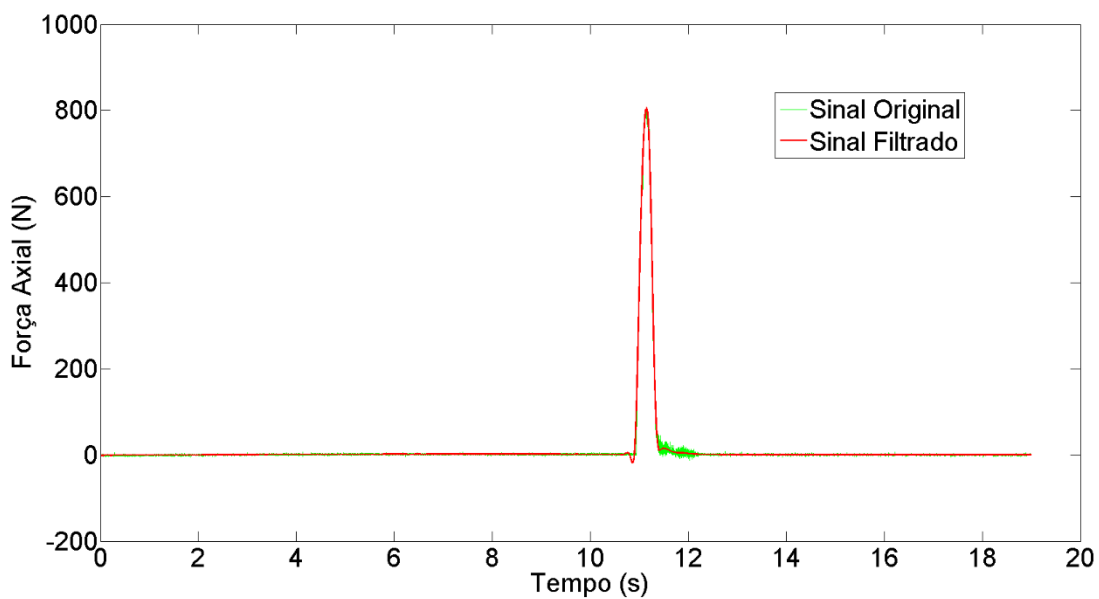
Como referido anteriormente, durante a realização dos ensaios foram observados alguns fenómenos como a incandescência e a fractura das ferramentas de corte. Um exemplo de um furo onde ocorreu a fusão da ferramenta está assinalado na Figura 4.3 (a). Este fenómeno ocorreu apenas com as brocas de aço rápido em todos os materiais utilizados. A quebra das ferramentas de corte aconteceu em ambas as brocas, mas maioritariamente nas de HSS-E, como assinalado na Figura 4.2 (c). No caso das brocas de HM apenas aconteceu num ensaio de criogenia, assinalado na Figura 4.3 (d). Este facto deveu-se provavelmente a condições de elevada fragilidade devido às baixas temperaturas atingidas (entre $-50.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$), tendo a fractura da broca ocorrido na zona de aperto.

Analizando os provetes da Figura 4.2 e Figura 4.3 cuja furação foi realizada nas mesmas condições de corte e com ferramentas de corte de material diferente, verifica-se que com os parâmetros e condições utilizadas as brocas de metal duro são mais eficientes na concretização do furo em comparação com as brocas de aço rápido cobalto.

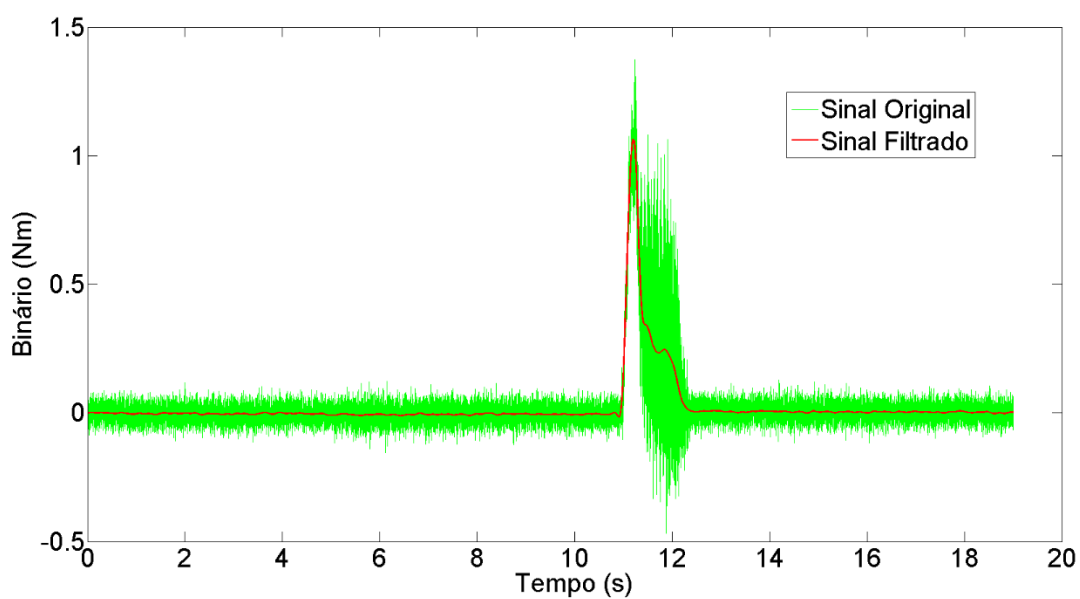
Deste ponto em diante os resultados apresentados serão apenas dos ensaios realizados com as ferramentas de metal duro, com excepção da análise das aparas.

No processo de furação foram adquiridos e filtrados os dados relativos à força axial e binário, sendo possível obter os respectivos valores máximos, apresentados na Tabela 4.1, com mais detalhe no Anexo A. Como exemplo, na Figura 4.4 podemos observar graficamente a evolução da força de avanço e binário num ensaio realizado no NiTi-2, nas condições de criogenia e com uma broca de

metal duro (furo designado com a nomenclatura NT2-B2-C8). Na imagem estão apresentados os sinais originais obtidos (verde) e respectivos sinais filtrados (vermelho).



(a)



(b)

Figura 4.4 Resultados da aquisição de dados, do furo NiTi2-B2-C8: (a) sinal original e filtrado da força axial; (b) sinal original e filtrado do binário

Tabela 4.1 Valores da força axial e binário dos ensaios realizados

NiTi-2 Emulsão			NiTi-3 Emulsão		
Ensaio	Força Axial [N]	Binário [Nm]	Ensaio	Força Axial [N]	Binário [Nm]
NT2-B2-E1	465.22	0.64	NT3-B2-E1	383.07	0.92
NT2-B2-E2	639.12	0.81	NT3-B2-E2	577.11	1.37
NT2-B2-E3	404.83	0.52	NT3-B2-E3	364.01	0.87
NT2-B2-E4	575.40	0.71	NT3-B2-E4	487.84	1.16
NT2-B2-E5	-	-	NT3-B2-E5	899.65	2.03
NT2-B2-E6	-	-	NT3-B2-E6	570.26	0.90
NT2-B2-E7	-	-	NT3-B2-E7	586.75	1.03
NT2-B2-E8	-	-	NT3-B2-E8	799.16	1.34
NT2-B2-E9	-	-	NT3-B2-E9	715.32	1.28
NT2-B2-E10	-	-	NT3-B2-E10	723.89	1.12

NiTi-2 Criogenia			NiTi-3 Criogenia		
Ensaio	Força Axial [N]	Binário [Nm]	Ensaio	Força Axial [N]	Binário [Nm]
NT2-B2-C1	1017	0.49	NT3-B2-C1	444.72	0.95
NT2-B2-C2	1140.4	1.32	NT3-B2-C2	421.71	0.80
NT2-B2-C3	419.83	0.54	NT3-B2-C3	705.13	1.29
NT2-B2-C4	595.44	0.69	NT3-B2-C4	545.35	1.02
NT2-B2-C5	854.00	1.46	NT3-B2-C5	598.80	1.02
NT2-B2-C6	384.37	0.56	NT3-B2-C6	485.78	0.71
NT2-B2-C7	607.42	0.93	NT3-B2-C7	458.12	0.71
NT2-B2-C8	808.42	1.07	NT3-B2-C8	646.68	1.18
NT2-B2-C9	803.75	0.90	NT3-B2-C9	540.95	0.92
NT2-B2-C10	803.75	0.90	NT3-B2-C10	540.95	0.92

Os resultados da ovalização e diâmetros dos furos foram obtidos para os provetes maquinados com ferramentas de metal duro para posterior análise através da resposta em superfície dos efeitos dos parâmetros de corte. Estes resultados são apresentados na Tabela 4.2 e foram obtidos através de um programa *Matlab* concebido para este efeito. No Anexo B encontra-se uma tabela mais detalhada, onde são apresentados os valores de diâmetro máximo e mínimo de cada ensaio.

Tabela 4.2 Valores da ovalização dos ensaios realizados

NiTi-2 Emulsão		NiTi-3 Emulsão	
Ensaio	Ovalização	Ensaio	Ovalização
NT2-B2-E1	0.14	NT3-B2-E1	0.23
NT2-B2-E2	0.13	NT3-B2-E2	0.20
NT2-B2-E3	0.19	NT3-B2-E3	0.36
NT2-B2-E4	0.12	NT3-B2-E4	0.25
NT2-B2-E5	0.32	NT3-B2-E5	0.26
NT2-B2-E6	0.18	NT3-B2-E6	0.40
NT2-B2-E7	0.07	NT3-B2-E7	0.21
NT2-B2-E8	0.30	NT3-B2-E8	0.30
NT2-B2-E9	0.10	NT3-B2-E9	0.05
NT2-B2-E10	0.10	NT3-B2-E10	0.05

NiTi-2 Criogenia		NiTi-3 Criogenia	
Ensaio	Ovalização	Ensaio	Ovalização
NT2-B2-C1	0.34	NT3-B2-C1	0.44
NT2-B2-C2	0.22	NT3-B2-C2	0.33
NT2-B2-C3	0.15	NT3-B2-C3	0.31
NT2-B2-C4	0.25	NT3-B2-C4	0.36
NT2-B2-C5	0.26	NT3-B2-C5	0.32
NT2-B2-C6	0.10	NT3-B2-C6	0.17
NT2-B2-C7	0.29	NT3-B2-C7	0.31
NT2-B2-C8	0.22	NT3-B2-C8	0.24
NT2-B2-C9	0.28	NT3-B2-C9	0.42
NT2-B2-C10	0.28	NT3-B2-C10	0.42

4.2 RESULTADOS DA METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Os parâmetros de processo em estudo e analisados foram os parâmetros de corte, nomeadamente a velocidade de corte e avanço. Para análise dos resultados utilizou-se a metodologia de superfície de resposta, com o planeamento de experiências definido no ponto 3.4 (Tabela 3.5).

A adequação dos modelos de resposta foi testada com intervalo de confiança de 95 % pela razão F do conjunto de ensaios, utilizando o *software Statistica*. Foi ainda realizada a análise da

normalidade da distribuição dos resíduos, a análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e aos valores observados nas experiências, para verificar a existência de outros factores a influenciar as respostas e a consistência do modelo.

No que diz respeito aos ensaios de furação realizados avaliaram-se as seguintes respostas:

- Força axial (Fa);
- Binário (B);
- Ovalização (Ex).

No entanto, por deficiência do equipamento, não foi possível obter os resultados da força axial e do binário em alguns ensaios efectuados no provete P2. Desta forma, serão apenas analisados os resultados obtidos para a ovalização. Nos restantes casos, P4, P6 e P8, foram estudados os efeitos dos parâmetros de corte sobre todas as respostas.

Devido a este facto, a análise comparativa relativamente ao material dos provetes será apenas realizada nas condições de criogenia.

4.2.1 Força axial

Para cada caso de estudo foi analisada a tabela da análise de variância para facilitar a compreensão das respostas em superfície obtidas. São ainda apresentados os respectivos modelos empíricos resultantes, polinómios de segundo grau, para cada estudo.

A tabela ANOVA para a resposta força axial (

Tabela 4.3) mostra o teste pela função F da adequação ao modelo.

A Figura 4.5 apresenta a análise da normalidade da distribuição dos resíduos referente a este modelo e a Figura 4.6 a respectiva análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e aos valores observados nas experiências.

Tabela 4.3 Tabela da análise da variância para a força axial do P4 (NiTi2, criogenia)

Factor	ANOVA P4 R ² = 0.88271				
	SS	df	MS	F	p
v (L)	407834.1	1	407834.1	26.23379	0.006877
v (Q)	16390.7	1	16390.7	1.05433	0.362547
f (L)	42525.0	1	42525.0	2.73541	0.173489
f (Q)	1099.9	1	1099.9	0.07075	0.803396
v x f	681.5	1	681.5	0.04384	0.844391
Erro	62184.6	4	15546.1		
Total SS	530193.0	9			

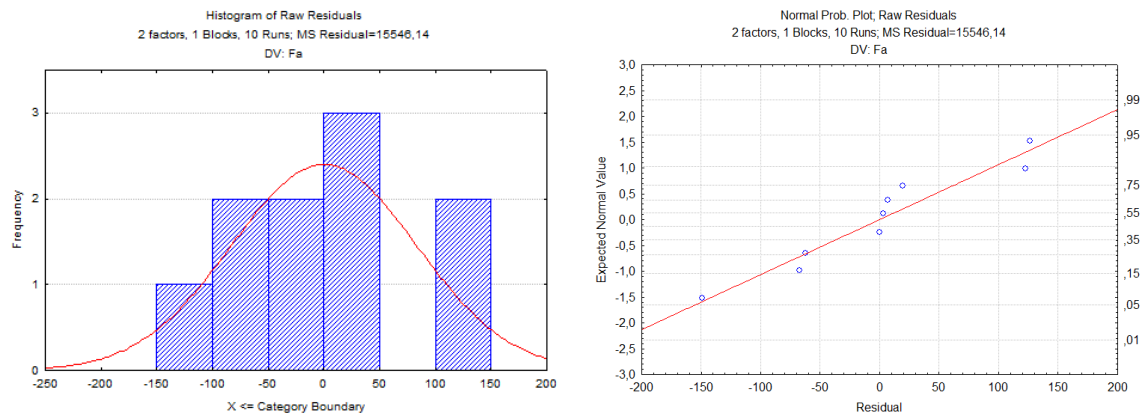


Figura 4.5 Análise da normalidade dos desvios - P4 (NiTi2, criogenia)

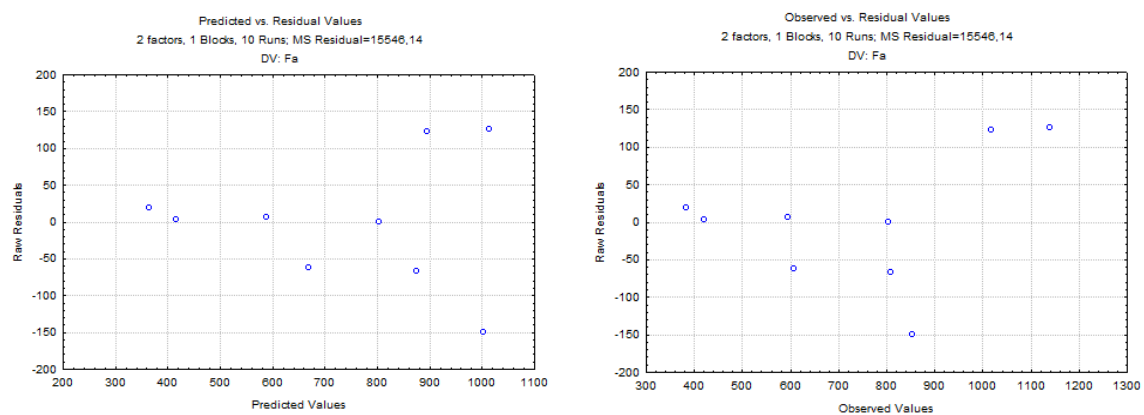


Figura 4.6 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P4 (NiTi2, criogenia)

A adequação deste modelo foi testada pela função F, como apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Tabela da análise da variância para a força axial do P6 (NiTi3, emulsão)

Factor	ANOVA P6 $R^2 = 0.44412$				
	SS	df	MS	F	p
v (L)	41207.1	1	41207.15	1.082706	0.356850
v (Q)	15146.8	1	15146.83	0.397979	0.562384
f (L)	47781.2	1	47781.16	1.255436	0.325243
f (Q)	28214.7	1	28214.71	0.741333	0.437786
v x f	1232.4	1	1232.36	0.032380	0.865945
Erro	152237.7	4	38059.42		
Total SS	273869.8	9			

No que diz respeito ao modelo obtido para o provete P6, a Figura 4.7 apresenta a análise da normalidade da distribuição dos resíduos e a Figura 4.8 a análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e aos valores observados nas experiências.

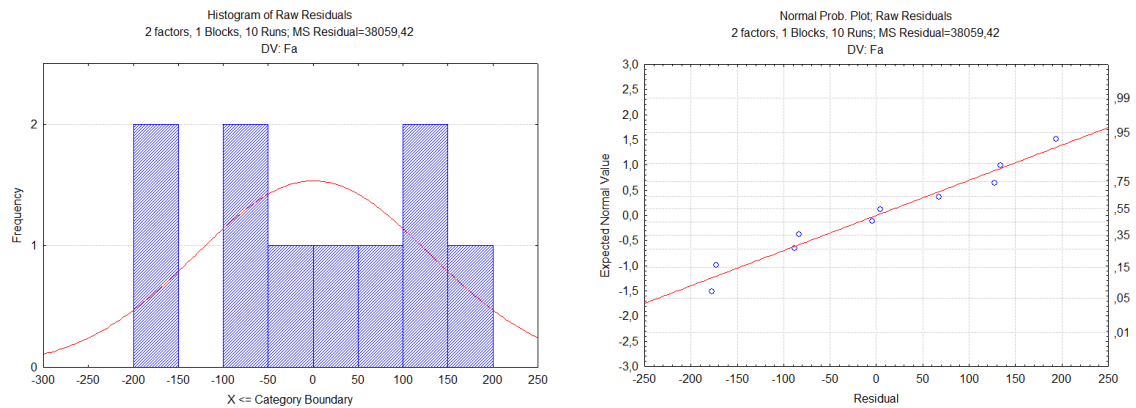


Figura 4.7 Análise da normalidade dos desvios - P6 (NiTi3, emulsão)

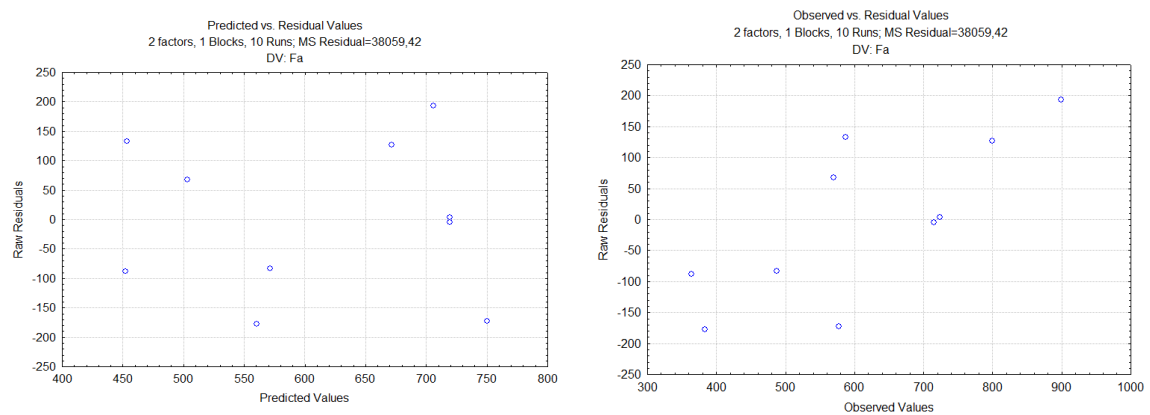


Figura 4.8 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P6 (NiTi3, emulsão)

A Tabela 4.5 mostra o teste pela função F da adequação do modelo.

Tabela 4.5 Tabela da análise da variância para a força axial do P8 (NiTi3, criogenia)

Factor	ANOVA P8 $R^2 = 0.15973$				
	SS	df	MS	F	p
v (L)	6284.08	1	6284.08	0.399726	0.561566
v (Q)	68.09	1	68.09	0.004331	0.950686
f (L)	879.36	1	879.36	0.055935	0.824657
f (Q)	6.53	1	6.53	0.000416	0.984710
v x f	4676.51	1	4676.51	0.297469	0.614461
Erro	62883.89	4	15720.97		
Total SS	74837.40	9			

As figuras Figura 4.9 e Figura 4.10 ilustram, respectivamente, a análise da normalidade da distribuição dos resíduos e a análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e aos valores observados nos ensaios conduzidos no provete P8.

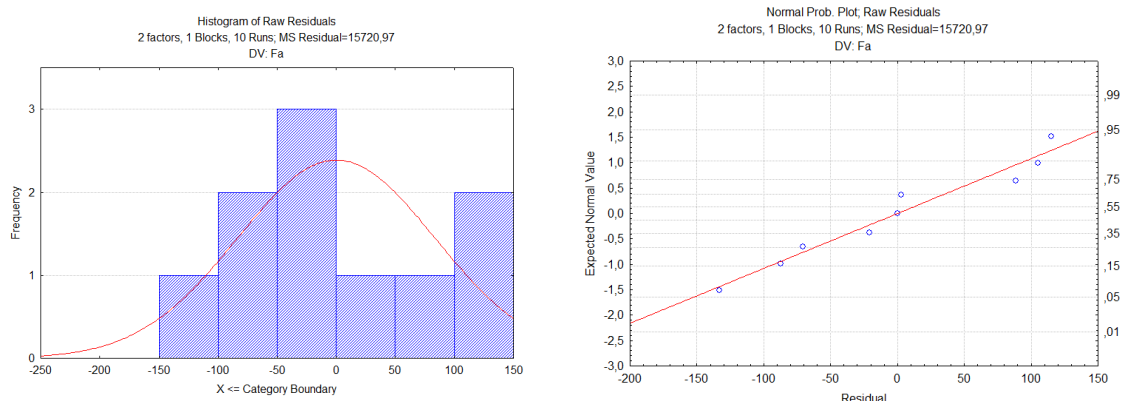


Figura 4.9 Análise da normalidade dos desvios - P8 (NiTi3, criogenia)

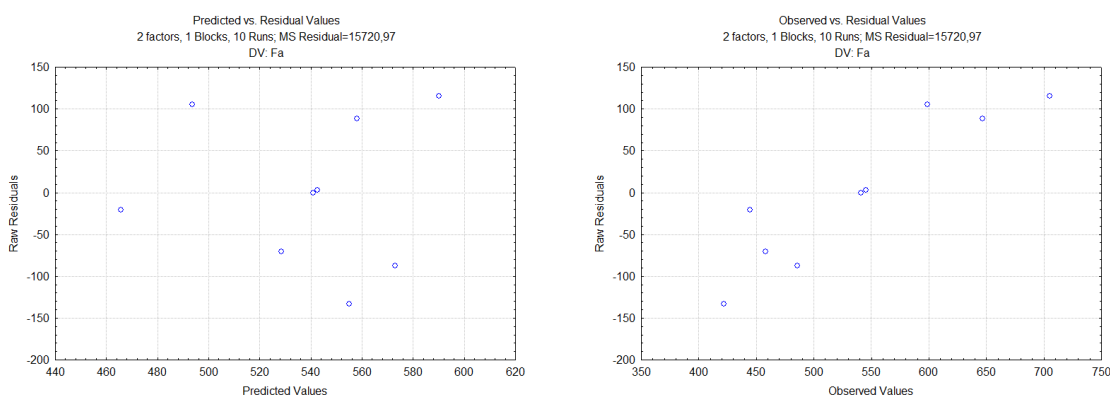


Figura 4.10 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P8 (NiTi3, criogenia)

Na Figura 4.11 são apresentadas as superfícies de resposta mostrando o efeito da interação da velocidade de corte e avanço sobre a força axial nos provetes P4, P6 e P8.

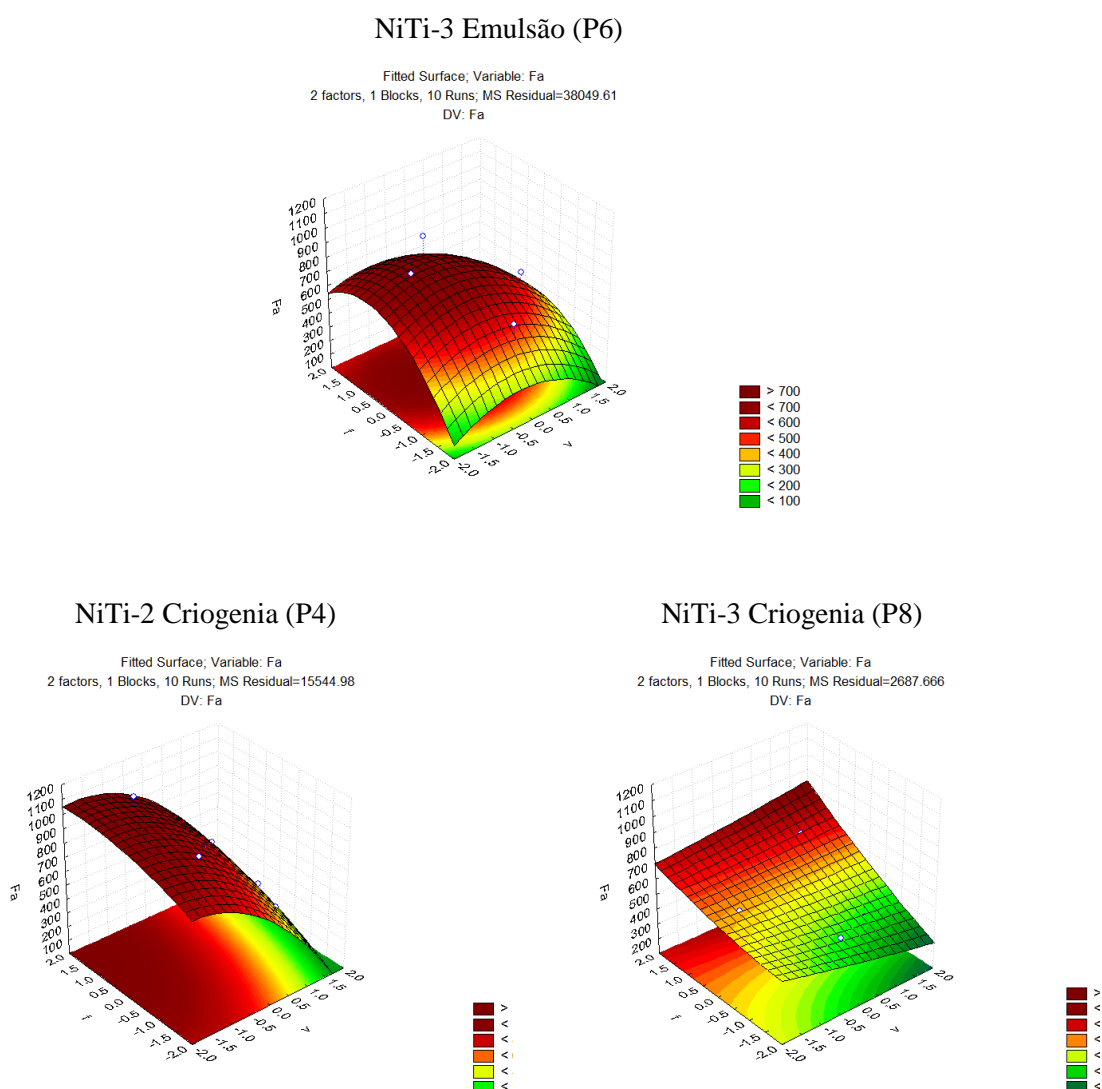


Figura 4.11 Superfície de resposta

Analisado o conjunto dos 3 modelos empíricos para previsão da força axial e através da análise de variância (ANOVA), observou-se que apenas a velocidade é um factor considerado significativo no modelo referente ao provete P4 (NiTi2, criogenia). Nos restantes modelos, nenhum parâmetro foi estatisticamente significativo para a resposta força axial. Apesar disso pode verificar-se que o termo com maior peso estatístico nos modelos em que se utilizou a criogenia é a velocidade de corte e, no modelo em que se utilizou emulsão é o avanço.

A medida de adequação habitualmente utilizada é o coeficiente de determinação R^2 , definido pela equação 4-1 que representa a proporção da variação total que é explicada pelo modelo. O modelo representa efectivamente a resposta do processo quando $R^2=1$.

$$R^2 = \frac{SS_{Regressão}}{SS_{Total}} = 1 - \frac{SS_{Resíduo}}{SS_{Total}} \quad 4-1$$

O modelo empírico obtido para o provete P4 possui um R^2 de cerca de 88 % o que indica que o modelo estima a resposta F_a com suficiente precisão. No entanto, o mesmo não se verificou para os restantes, sendo o modelo empírico obtido para o provete P8 não adequado por apresentar um R^2 de cerca de 16 %.

Para todos os casos, verificou-se que existe uma distribuição suficientemente normal dos resíduos. Observa-se também que existe uma distribuição aleatória dos resíduos face aos valores previstos do modelo e aos valores observados nos ensaios. Assim, pode admitir-se não existirem outros factores a influenciar a resposta.

Apesar de através da análise estatística nenhum factor se apresentar significativo, é possível observar pela análise da respectiva representação gráfica que nos furos obtidos no provete P6 (com emulsão) a força axial é influenciada quer pela velocidade de corte, quer pelo avanço. Com efeito, a força axial tende a aumentar com o aumento do avanço. Utilizando valores de avanço mais baixos, independentemente da velocidade de corte, a força axial apresenta menores valores. No entanto, para valores mais elevados de velocidade de corte, encontram-se também valores inferiores de F_a com a utilização de maior avanço.

No que diz respeito aos ensaios realizados com criogenia, verifica-se a maior influência da velocidade de corte relativamente ao avanço. A força axial tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte nas experiências realizadas com o material NiTi-2. Para o material NiTi-3, a força axial tende a aumentar com a velocidade de corte quando se utilizam avanços altos e tende a diminuir quando se utilizam avanços mais baixos.

Comparando os resultados obtidos para os provetes P4 e P8 (criogenia) é possível verificar que, em termos gerais, a força axial apresenta valores mais elevados no material NiTi-2 (P4) do que no material NiTi-3 (P8). Este fenómeno seria expectável uma vez que o material NiTi-3 apresenta uma maior percentagem atómica de Níquel na sua composição. Para o mesmo material (NiTi-3) os valores da força axial são mais elevados quando se realiza o processo com criogenia, quando comparado com a realização do processo com emulsão. A Figura 4.12 ilustra esta afirmação e também a tendência anteriormente referida do aumento da força axial com o aumento do avanço para o valor central do domínio da variável velocidade de corte ($v = 42.5$ m/min, correspondente ao nível 0).

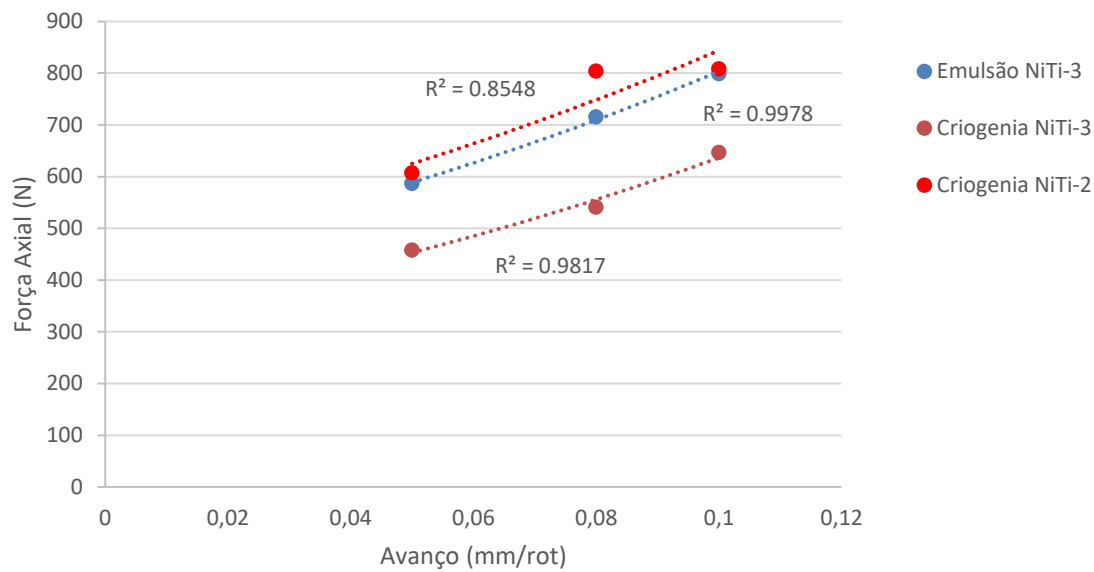


Figura 4.12 Comportamento da força axial consoante o avanço nos ensaios P4, P6 e P8 (velocidade constante, $v=42.5$ m/min)

4.2.2 Binário

A aplicação da metodologia de superfície de resposta foi realizada para a resposta binário de forma análoga à da força axial. As tabelas ANOVA para a resposta binário (Tabela 4.6, Tabela 4.7 e Tabela 4.8) mostram o teste pela função F da adequação ao modelo. Finalmente, a análise da normalidade da distribuição dos resíduos e a respectiva análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e aos valores observados nas experiências são apresentados nas Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15, Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18.

Tabela 4.6 Tabela da análise da variância para o binário do P4 (NiTi2, criogenia)

Factor	ANOVA P4 $R^2 = 0.7370$ $F_{(1,4,0.05)}=7.71$				
	SS	df	MS	F	p
v (L)	0,42910	1	0,429105	6,692017	0,060883
v (Q)	0,000179	1	0,000179	0,002785	0,960444
f (L)	0,173458	1	0,173458	2,705121	0,175372
f (Q)	0,000579	1	0,000579	0,009023	0,928892
v x f	0,115600	1	0,115600	1,802816	0,250505
Erro	0,256488	4	0,064122		
Total SS	0,975240	9			

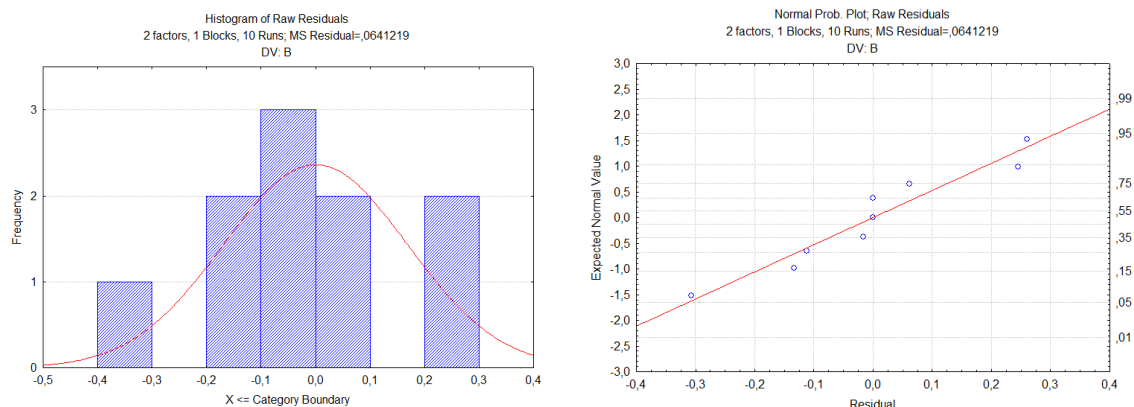


Figura 4.13 Análise da normalidade dos desvios - P4 (NiTi2, criogenia)

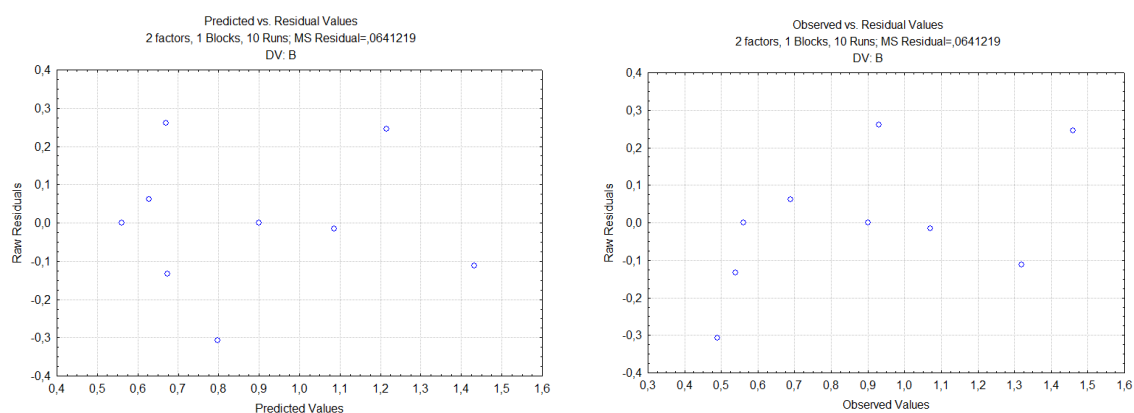


Figura 4.14 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P4 (NiTi2, criogenia)

Tabela 4.7 Tabela da análise da variância para o binário do P6 (NiTi3, emulsão)

Factor	ANOVA P6				
	$R^2 = 0.65214$				
	$F_{(1,4,0.05)}=7.71$				
	SS	df	MS	F	p
v (L)	0.431549	1	0.431549	4.690484	0.096267
v (Q)	0.023207	1	0.023207	0.252237	0.641892
f (L)	0.173580	1	0.173580	1.886634	0.241536
f (Q)	0.021607	1	0.021607	0.234847	0.653294
v x f	0.006400	1	0.006400	0.069561	0.805007
Erro	0.368021	4	0.092005		
Total SS	1.057960	9			

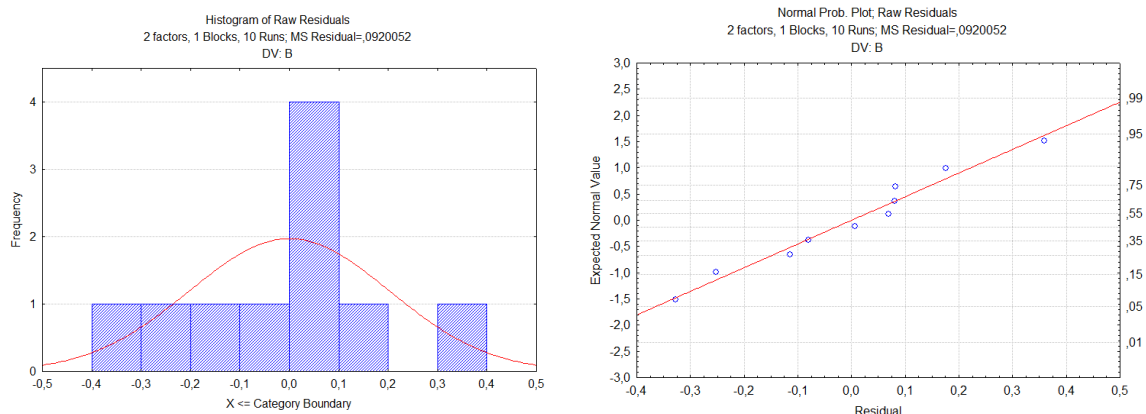


Figura 4.15 Análise da normalidade dos desvios - P6 (NiTi3, emulsão)

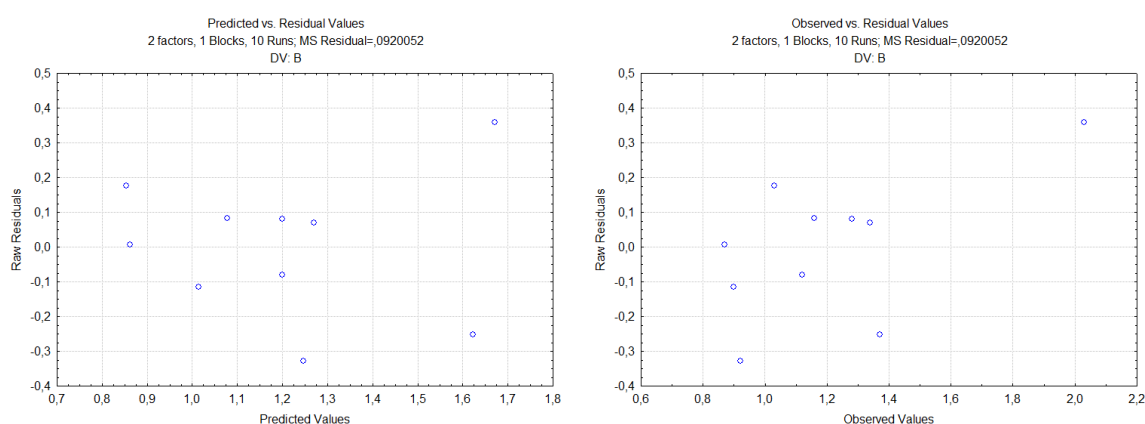


Figura 4.16 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P6 (NiTi3, emulsão)

Tabela 4.8 Tabela da análise da variância para o binário do P8 (NiTi3, criogenia)

Factor	ANOVA P8 $R^2 = 0.06889$ $F_{(1,4,0.05)}=7.71$				
	SS	df	MS	F	p
v (L)	0.001848	1	0.001848	0.024986	0.882061
v (Q)	0.000000	1	0.000000	0.000000	1.000000
f (L)	0.007484	1	0.007484	0.101174	0.766339
f (Q)	0.007314	1	0.007314	0.098886	0.768890
v x f	0.003600	1	0.003600	0.048670	0.836196
Erro	0.295868	4	0.073967		
Total SS	0.317760	9			

A partir da análise da Tabela 4.8, obtivemos um valor de R^2 muito baixo, o que indica que o modelo não é adequado.

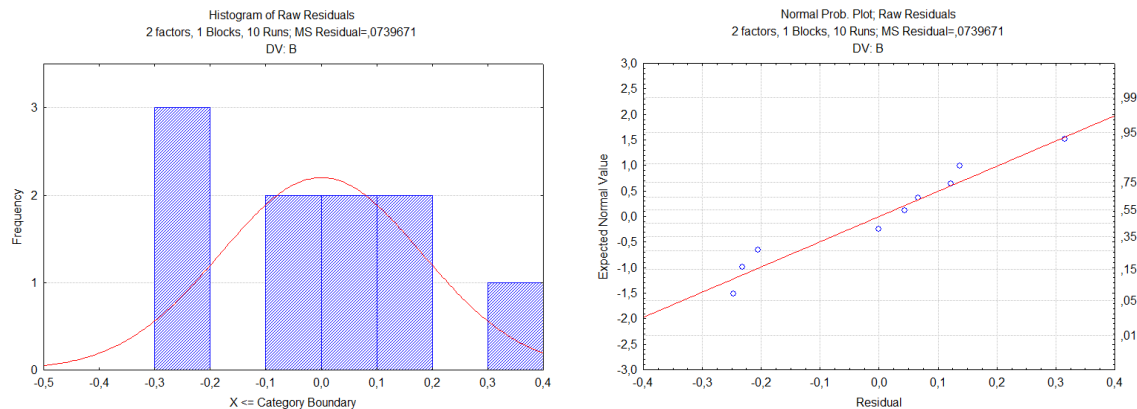


Figura 4.17 Análise da normalidade dos desvios - P8 (NiTi3, criogenia)

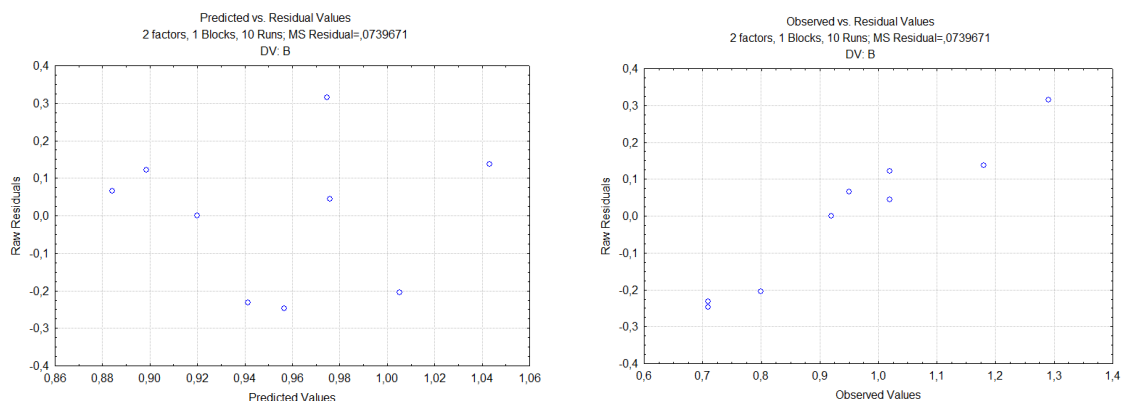


Figura 4.18 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P8 (NiTi3, criogenia)

Pode afirmar-se que os modelos empíricos obtidos para os provetes P4 e P6 estimam a resposta B com suficiente precisão, e o maior valor de R^2 (cerca de 74 %) foi obtido para o provete P4 (maquinagem com criogenia). O modelo empírico obtido para o provete P8 mostrou-se novamente não adequado por apresentar um R^2 de cerca de 7 %. Neste caso, existe algum indício de que existe outro factor a influenciar a resposta quando se analisa a distribuição dos resíduos e por se verificar uma tendência crescente e não aleatória face aos valores observados nos ensaios.

Nos restantes casos (provetes P4 e P6) a distribuição normal dos resíduos e a sua aleatoriedade face aos valores previstos e observados, conduz à conclusão de não existirem outros factores a influenciar a resposta.

Apesar de nenhum factor ser estatisticamente significativo, o conhecimento dos mecanismos do processo de furação em aço aponta para a influência de ambos os parâmetros de corte sobre o binário, sendo que tipicamente a influência do avanço é mais dominante do que a da velocidade de corte. Com efeito, o aumento quer da velocidade de corte, quer do avanço implicam o aumento do

binário. A Figura 4.19 representa as superfícies de resposta mostrando o efeito da interação da velocidade de corte e avanço nos provetes P4, P6 e P8.

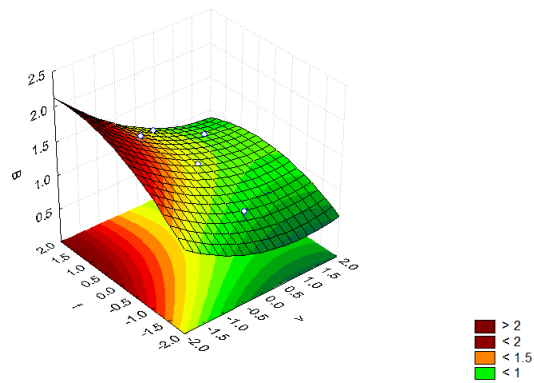
No modelo P4 o binário aumenta com o aumento do avanço sendo esta tendência mais evidente quando se utilizam velocidades de corte mais baixas. Para os valores mais elevados de velocidade de corte, o binário decresce ligeiramente com o aumento do avanço. Com o aumento da velocidade de corte o binário tende a decrescer quando se utilizam valores elevados de avanço. No modelo P6 verifica-se a diminuição dos valores de binário com a velocidade de corte e o aumento com o aumento do avanço. Apesar do modelo P8 não ter sido considerado adequado, observamos que o binário tende a aumentar com o aumento do avanço. Verifica-se ainda que, para valores mais elevados de avanço, o binário aumenta com o aumento da velocidade de corte, invertendo-se esta tendência para valores mais baixos de avanço.

Comparando os resultados obtidos para os provetes P4 e P8 (criogenia) é possível verificar que, em termos gerais, existe um maior intervalo de resultados do binário no material NiTi-2 (P4) do que no material NiTi-3 (P8), sendo os valores obtidos neste último mais constantes.

No gráfico da Figura 4.20 pode observar-se a tendência do aumento do binário com o aumento do valor do avanço, para uma velocidade constante ($v = 42.5$ m/min), menos evidente no caso dos ensaios realizados no material NiTi-2. Verifica-se que os valores do binário são mais elevados nos ensaios realizados com emulsão.

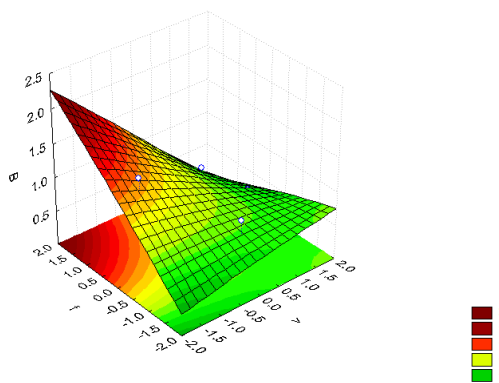
NiTi-3 Emulsão (P6)

Fitted Surface; Variable: B
2 factors, 1 Blocks, 10 Runs; MS Residual= 0920155
DV: B



NiTi-2 Criogenia (P4)

Fitted Surface; Variable: B
2 factors, 1 Blocks, 10 Runs; MS Residual= .0641223
DV: B



NiTi-3 Criogenia (P8)

Fitted Surface; Variable: B
2 factors, 1 Blocks, 10 Runs; MS Residual= .0168692
DV: B

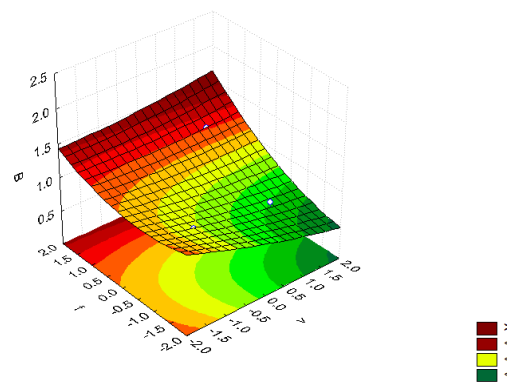


Figura 4.19 Superfície de resposta

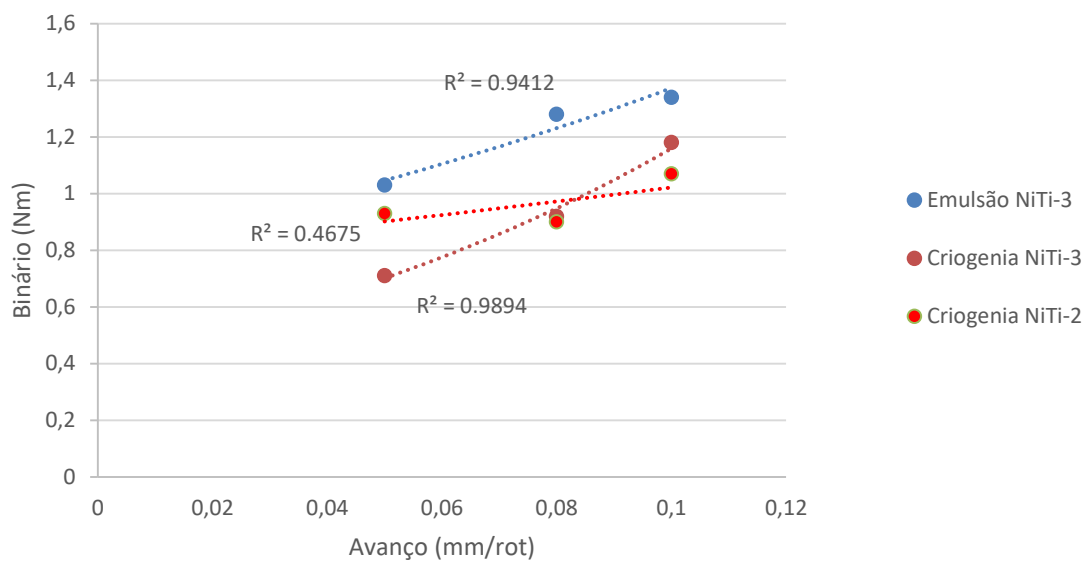


Figura 4.20 Comportamento do binário consoante o avanço nos ensaios P4, P6 e P8 (velocidade constante, $v=42.5$ m/min)

4.2.3 Ovalização

Por último, procedeu-se à análise através da metodologia de superfície de resposta para a resposta ovalização dos furos. Para cada provete analisado obtiveram-se as tabelas ANOVA (Tabela 4.9, Tabela 4.10, Tabela 4.11 e Tabela 4.12) que mostram o teste pela função F da adequação ao modelo. Finalmente, a análise da normalidade da distribuição dos resíduos e a respectiva análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e aos valores observados nas experiências são apresentados nas Figura 4.21, Figura 4.22, Figura 4.23, Figura 4.24, Figura 4.25, Figura 4.26, Figura 4.27 e Figura 4.28.

Tabela 4.9 Tabela da análise da variância para a ovalização do P2 (NiTi2, emulsão)

Factor	ANOVA P2 $R^2 = 0.40849$				
	SS	df	MS	F	p
v (L)	0,003120	1	0,003120	0,327374	0,597831
v (Q)	0,014788	1	0,014788	1,551566	0,280884
f (L)	0,007520	1	0,007520	0,788989	0,424593
f (Q)	0,002716	1	0,002716	0,284981	0,621741
v x f	0,000900	1	0,000900	0,094432	0,773951
Erro	0,038123	4	0,009531		
Total SS	0,064450	9			

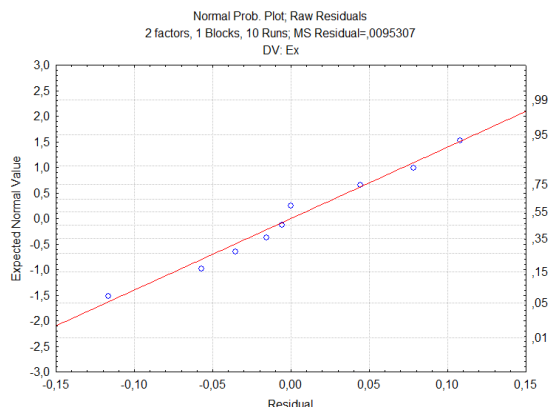
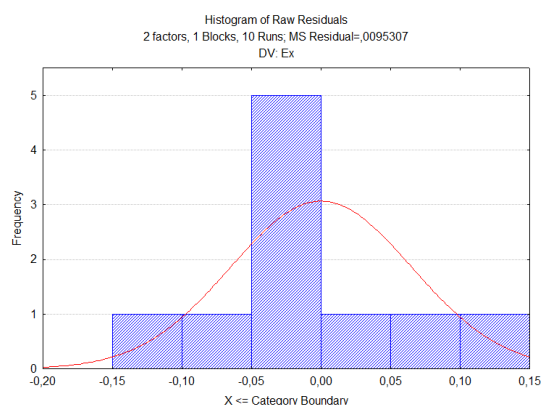


Figura 4.21 Análise da normalidade dos desvios - P2 (NiTi2, emulsão)

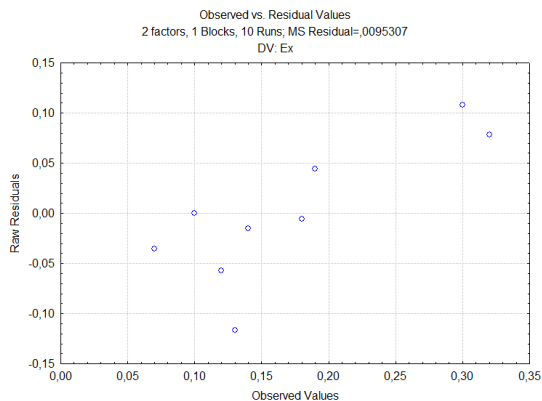
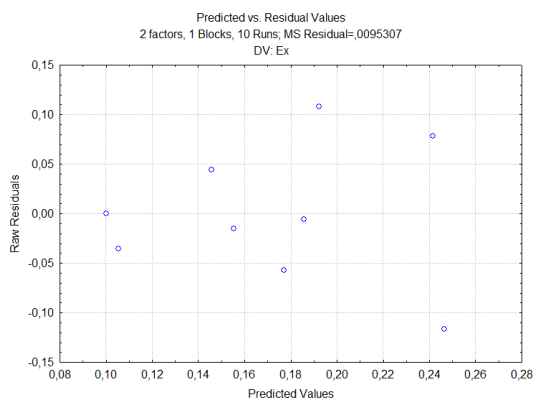


Figura 4.22 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P2 (NiTi2, emulsão)

Tabela 4.10 Tabela da análise da variância para a ovalização do P4 (NiTi2, criogenia)

Factor	ANOVA P4 $R^2 = 0.94760$				
	SS	df	MS	F	p
v (L)	0.018651	1	0.018651	31.86078	0.004851
v (Q)	0.009002	1	0.009002	15.37743	0.017227
f (L)	0.001770	1	0.001770	3.02358	0.157050
f (Q)	0.000216	1	0.000216	0.36911	0.576293
v x f	0.012100	1	0.012100	20.66999	0.010446
Erro	0.002342	4	0.000585		
Total SS	0.044690	9			

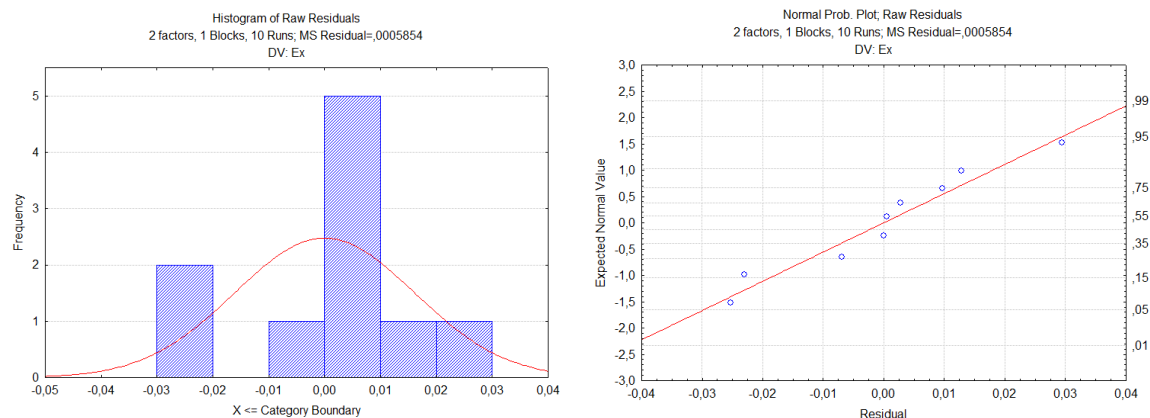


Figura 4.23 Análise da normalidade dos desvios - P4 (NiTi2, criogenia)

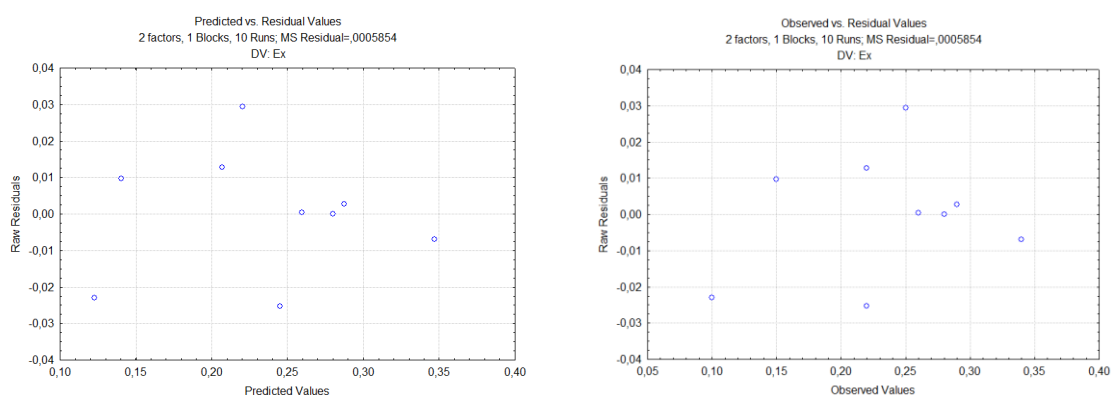


Figura 4.24 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P4 (NiTi2, criogenia)

Tabela 4.11 Tabela da análise da variância para a ovalização do P6 (NiTi3, emulsão)

Factor	ANOVA P6 R2 = 0.90615				
	SS	df	MS	F	p
v (L)	0.017860	1	0.017860	6,44590	0,064057
v (Q)	0,079502	1	0,079502	28,69394	0,005859
f (L)	0,000020	1	0,000020	0,00730	0,936015
f (Q)	0,040716	1	0,040716	14,69533	0,018563
v x f	0,001600	1	0,001600	0,57748	0,489628
Erro	0,011083	4	0,002771		
Total SS	0,118090	9			

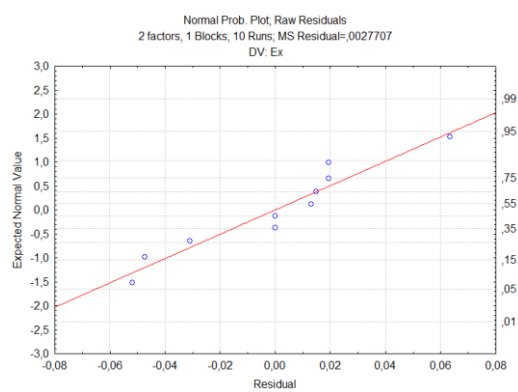
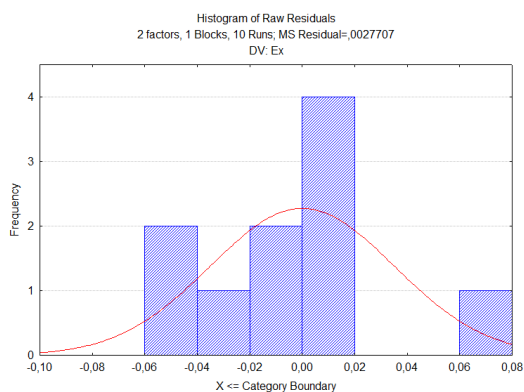


Figura 4.25 Análise da normalidade dos desvios - P6 (NiTi3, emulsão)

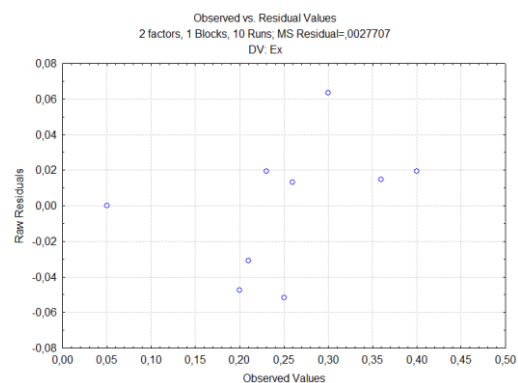
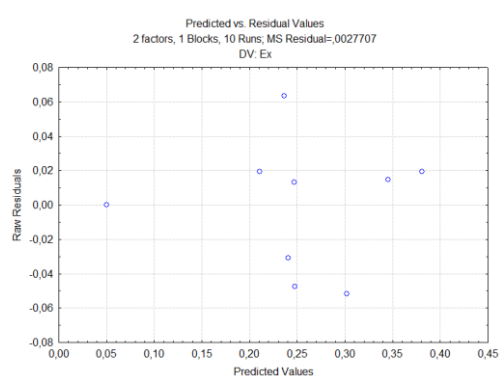


Figura 4.26 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P6 (NiTi3, emulsão)

Tabela 4.12 Tabela da análise da variância para a ovalização do P8 (NiTi3, criogenia)

Factor	ANOVA P8 $R^2 = 0.65869$				
	SS	df	MS	F	p
v (L)	0.012178	1	0.012178	2.238476	0.208947
v (Q)	0.017857	1	0.017857	3.282295	0.144260
f (L)	0.003160	1	0.003160	0.580821	0.488452
f (Q)	0.010314	1	0.010314	1.895854	0.240581
v x f	0.006400	1	0.006400	1.176375	0.339094
Erro	0.021762	4	0.005440		
Total SS	0.063760	9			

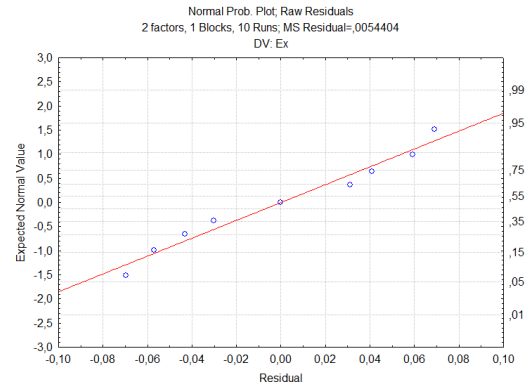
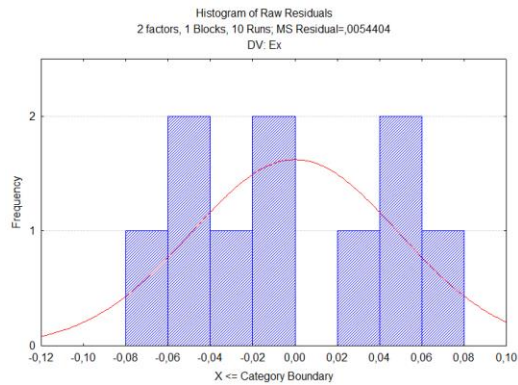


Figura 4.27 Análise da normalidade dos desvios - P8 (NiTi3, criogenia)

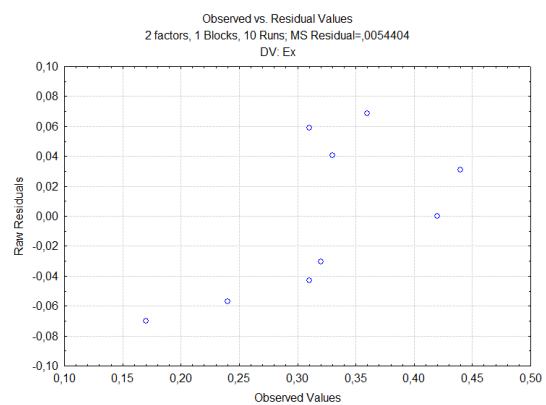
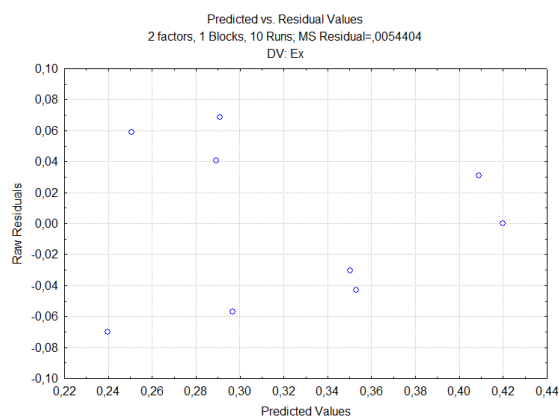


Figura 4.28 Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios - P8 (NiTi3, criogenia)

Apresentados os modelos empíricos de superfície de resposta para previsão da ovalização dos furos, efectuou-se a sua análise tendo-se observado que as variáveis que influenciam a resposta são os dois parâmetros de corte estudados. A distribuição normal dos resíduos e a sua aleatoriedade face aos valores previstos pelo modelo e observados nos ensaios indicam não existirem outros factores a influenciar a resposta.

Os modelos empíricos obtidos estimam a resposta ovalização com suficiente precisão, com excepção do modelo P2 cujo valor de R^2 é de cerca de 41 %.

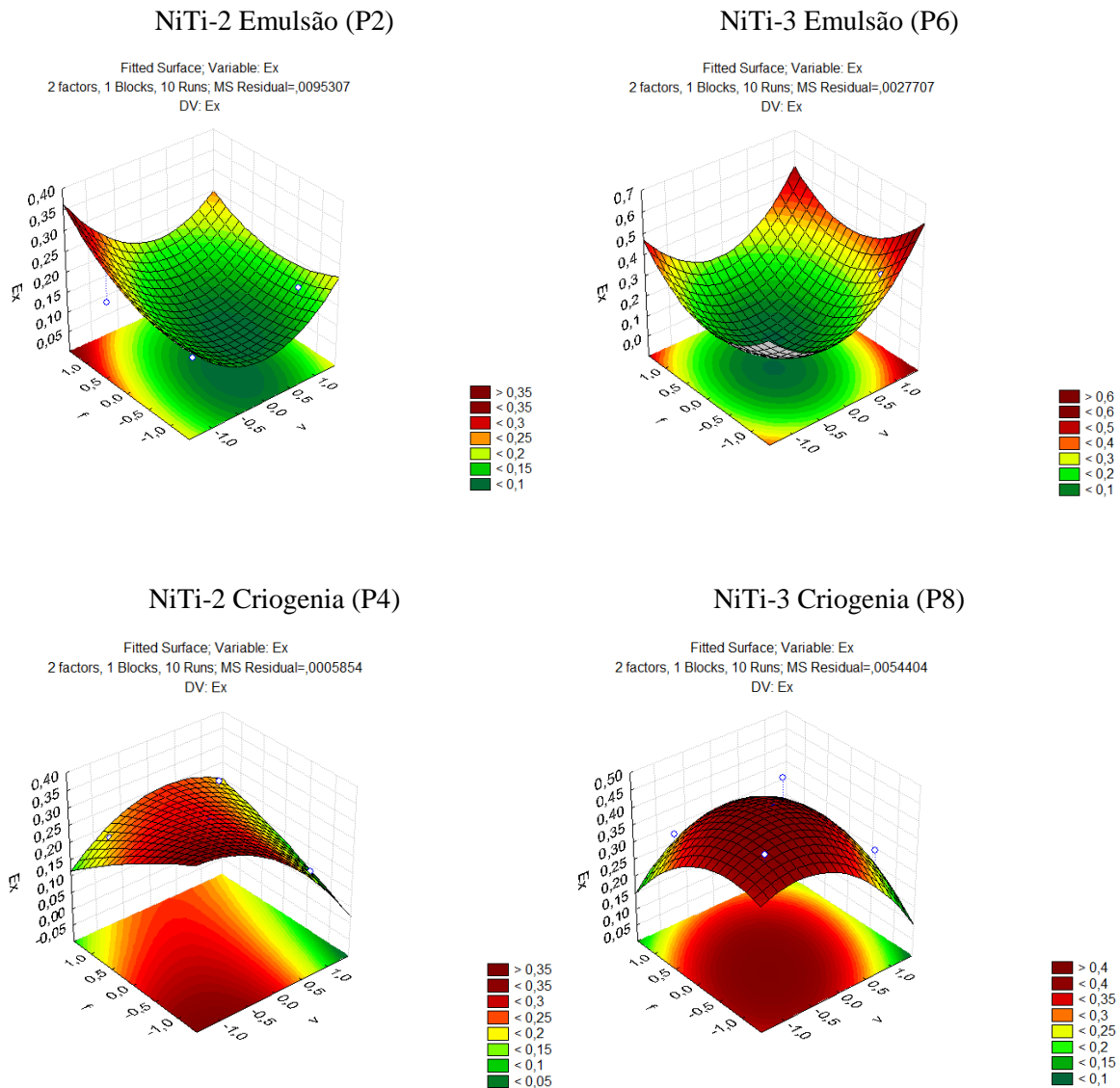


Figura 4.29 Superfície de resposta

A Figura 4.29 representa as superfícies de resposta mostrando o efeito da interação da velocidade de corte e avanço nos provetes P2, P4, P6 e P8. Através da análise das superfícies de resposta, percebemos que para as mesmas condições de furação, apresentam o mesmo sentido de inflexão de curvatura, o que pode demonstrar coerência física para cada modelo. Assim, podemos concluir que para a furação com emulsão os valores centrais de velocidade e avanço são os que apresentam melhores condições do furo (baixa ovalização). Em relação a P4 e P8 (furação com criogenia) percebemos que para obtermos baixa ovalização dos furos temos que trabalhar com avanço elevado e velocidades mais baixas ou então com velocidades elevadas e avanço baixo, pois em P4 verificamos que a velocidade e avanço influenciam a resposta, mas também é verificado o efeito cruzado.

4.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE

As observações seguintes são referentes à furação das ligas de NiTi com broca de metal duro nas condições de furação apresentadas nas figuras.

A Figura 4.30 representa o comportamento da energia específica de corte segundo a variação do avanço quando maquinadas as ligas de NiTi 2 e 3 nas condições de criogenia com uma velocidade constante de 42.5 m/min. No gráfico da figura pode observar-se que na furação do NiTi3 a energia específica de corte é menor quando o avanço é de 0.08 mm/rot enquanto que no NiTi2 é para um avanço de 0.1 mm/rot.

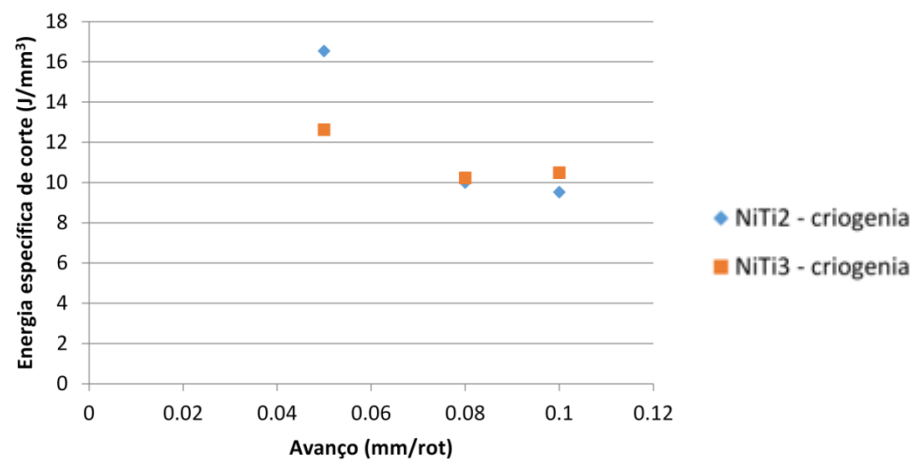


Figura 4.30 Energia específica de corte em função do avanço (velocidade constante, $v=42.5$ m/min)

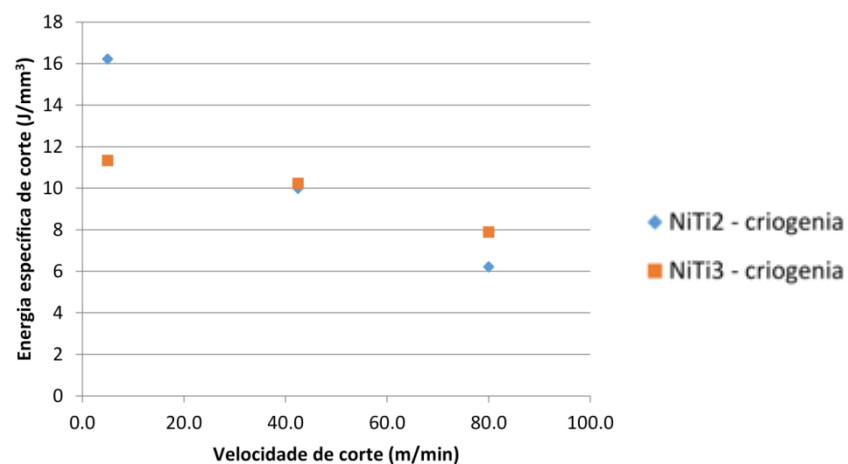


Figura 4.31 Energia específica de corte em função da velocidade de corte (avanço constante, $f=0.08$ mm/rot)

A Figura 4.31 representa o comportamento da energia específica de corte segundo a variação da velocidade de corte quando maquinadas as ligas de NiTi 2 e 3 nas condições de criogenia com um avanço constante 0.08 mm/rot. No gráfico da figura pode observar-se que, em ambos os materiais, não existe grande diferença de energia de corte com a variação da velocidade de corte. Aponta-se que haja um intervalo de valores de velocidade de corte óptimos, em torno dos 80 m/min.

A Figura 4.32 e Figura 4.33 representam o comportamento da potência de corte segundo, respectivamente, a variação do avanço ($v = 42.5$ m/min) e variação da velocidade de corte ($f = 0.08$ mm/rot). Através da análise de ambos os gráficos das imagens pode-se observar que na maquinagem com maiores valores quer de velocidade de corte, quer de avanço, a potência de corte é inferior para o material NiTi-2.

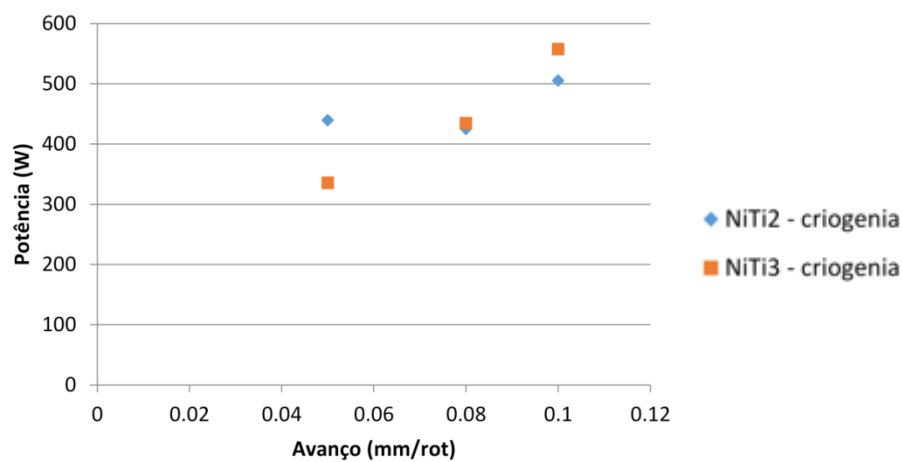


Figura 4.32 Potência de corte em função do avanço (velocidade constante, $v=42.5$ m/min)

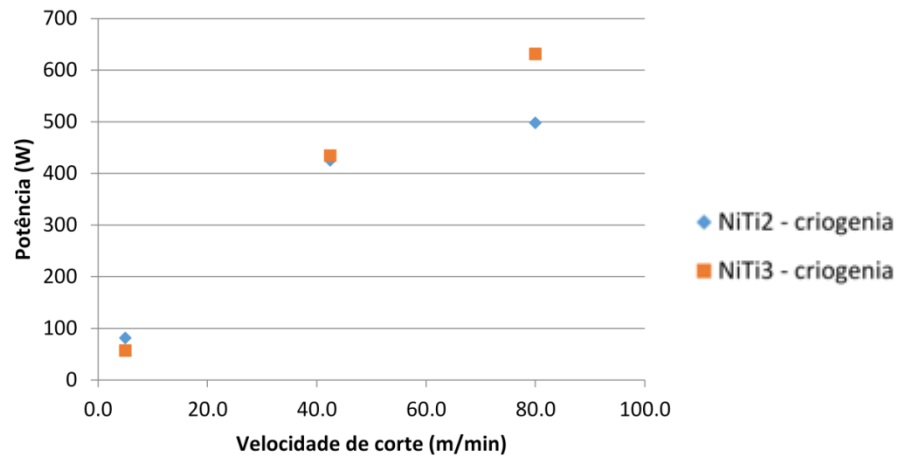


Figura 4.33 Potência de corte em função da velocidade de corte (avanço constante, $f=0.08$ mm/rot)

A Figura 4.34 e Figura 4.35 representam o comportamento da ovalização segundo a variação do avanço (velocidade constante de 42.5 m/min), em condições de criogenia e de emulsão respectivamente. Pode observar-se nos gráficos das figuras que as linhas de tendência da ovalização, nas condições de criogenia e emulsão, apresentam a mesma inflexão da curvatura que as superfícies em resposta. Assim conclui-se que na condição de criogenia, para uma velocidade de 42.5 m/min, os valores mais baixos da ovalização são avanços baixos ou avanços elevados. Na condição de emulsão, para uma velocidade de 42.5 m/min, os valores mais baixos de ovalização são verificados para um intervalo de valores de avanço $f=0.06$ mm/rot e $f=0.08$ mm/rot.

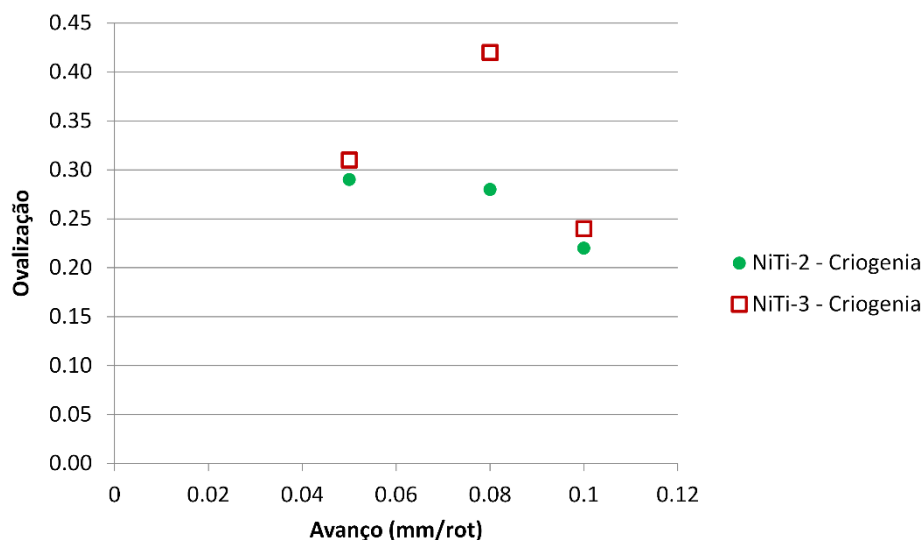


Figura 4.34 Ovalização em função do avanço (velocidade constante, $v=42.5$ m/min)

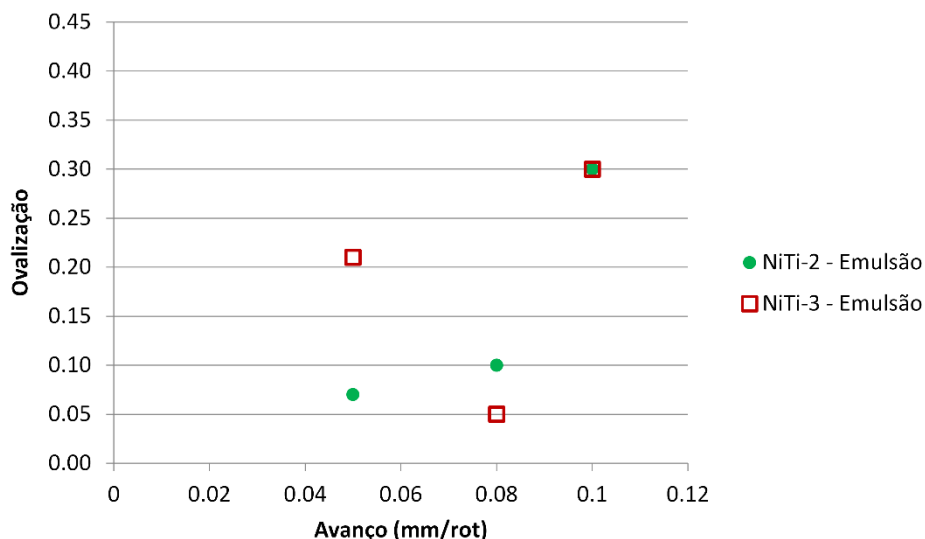


Figura 4.35 Ovalização em função do avanço (velocidade constante, $v=42.5$ m/min)

4.4 RESULTADOS DA ANÁLISE DAS APARAS

A apara obtida na furação das ligas NiTi com as brocas de aço rápido e metal duro foram de dois tipos, contínua regular e contínua irregular, característica numa furação com médias e elevadas velocidades de corte e de baixas velocidades, respectivamente.

Para efectuar a codificação da forma da apara foi utilizado a norma ISO 3685 (Figura 2.17, capítulo 2.5), onde se pode observar as formas de aparas que ocorrem na maquinagem. Em ambas as brocas se obtiveram aparas idênticas, em forma helicoidal cónica longa e enrolada e em forma de fita enrolada. Verificou-se que na presença de fluido de corte durante a maquinagem, condição de emulsão, não pareceu alterar a forma da apara obtida.

Depois de uma análise visual à apara foram realizados ensaios DRX ao material e às aparas. Inicialmente foi feita uma análise DRX ao material base (NiTi-2) de modo a determinar as fases presentes à temperatura ambiente, como pode observar-se na Figura 4.37. Verifica-se através desta liga NiTi que apresenta o pico característico à da fase cristalina austenítica (A). O pico de austenite aparece para um valor de $2\theta = 3.83^\circ$ referente ao plano cristalógrafo (110). Daqui em diante todos os resultados do DRX são referentes ao pico de difracção correspondente ao plano de austenite.

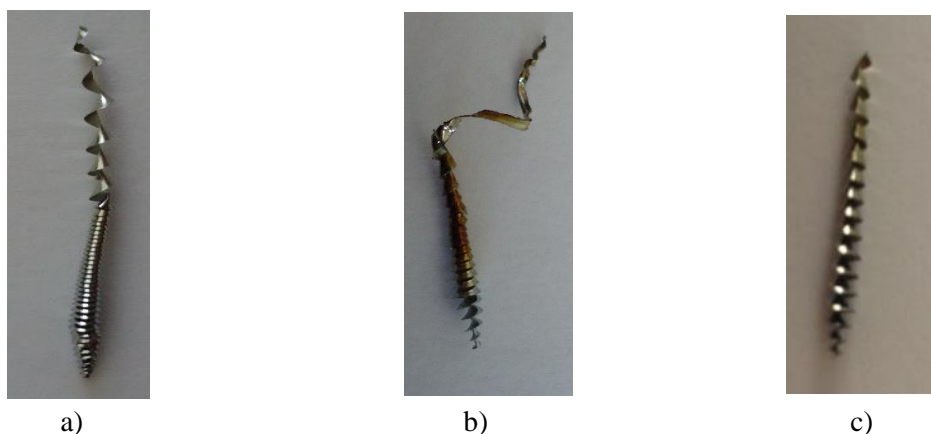


Figura 4.36 Aparas obtidas na maquinagem: a) Furo NT2-B2-C7; b) NT2-B2-C4; c) NT2-B2-E2

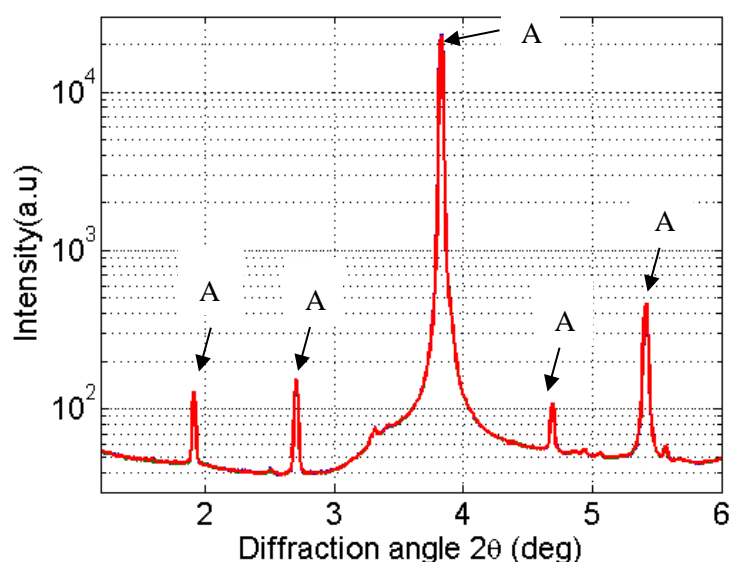


Figura 4.37 Difratoograma do ensaio DRX ao material NiTi-2 à temperatura ambiente

Apesar de a apara ser analisada após ser realizado o furo acredita-se que através da análise da apara possamos retirar conclusões sobre o material quando furado. Para analisar as aparas de ensaios realizados, foi construído um difratograma através do programa Matlab, e comparado com o material base, de modo a perceber as alterações estruturais na apara.

Na Figura 4.38 está representado o difratograma do ensaio NT2-B1-C5 (linhas superiores do gráfico) e do material base (linha inferior a azul). Através desta imagem podemos observar que a apara à temperatura ambiente está austenítica, no entanto o pico de deformação austenítico é muito mais largo em comparação com o material base, o que demonstra que sofreu elevadas alterações estruturais da apara.

A Figura 4.39 é uma vista projecta da Figura 4.38, onde conseguimos ter noção dos vários scans feitos ao longo da apara. Apesar de o material ter sofrido alterações como foi dito anteriormente, conseguimos observar a homogeneidade do material ao longo da apara.

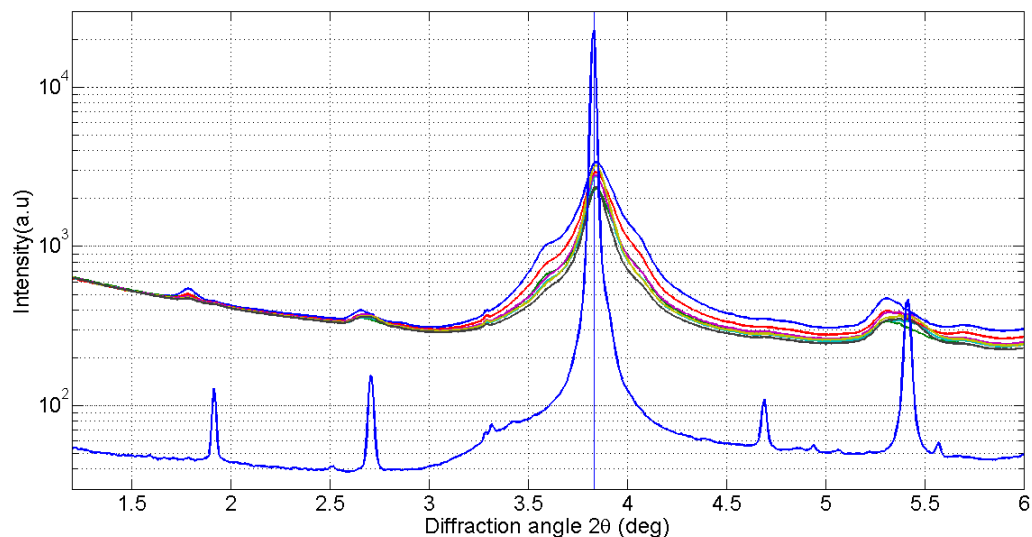


Figura 4.38 Difractograma do ensaio NT2-B1-C5 com o material base

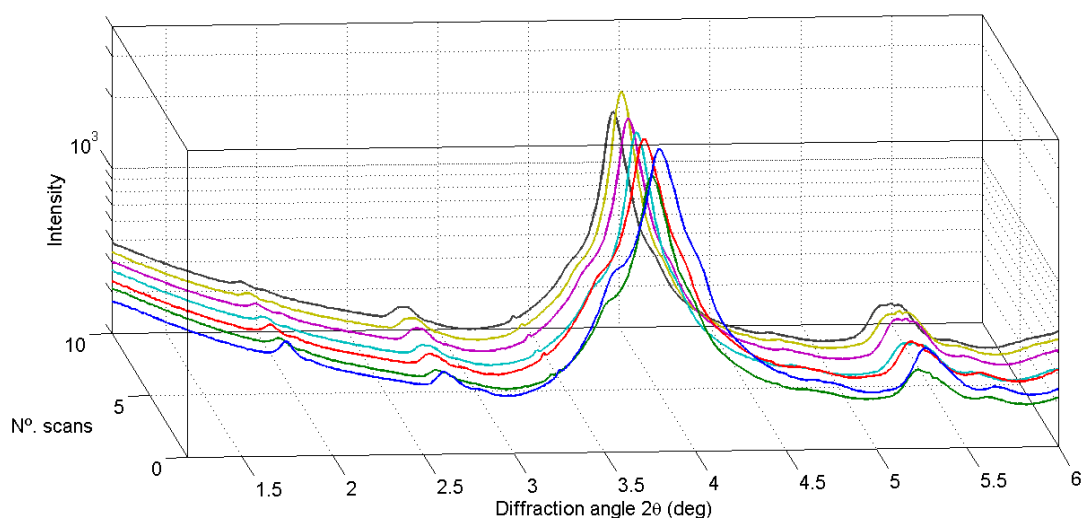


Figura 4.39 NT-B1-C5 apenas a apara

Para uma melhor análise dos dados DRX das aparas foi calculada a largura a meia altura (FWHM) de cada pico difracção (Anexo D). Através dos valores da largura a meia altura consegue-se entender o efeito do arranque de apara quando se está a furar, que pode ser feito pelo processo de deformação (encruamento), ou por deformação de elevadas temperaturas.

Na Figura 4.40 estão representados graficamente os valores da FWHM obtidos para ensaio analisado. No eixo horizontal do gráfico, está representada a posição normalizada para cada uma das aparas de modo a podermos analisar os ensaios nas mesmas condições.

Teoricamente quanto maior os valores da largura a meia altura, mais encruamento está o material, ou seja, temos um aumento da densidade de defeitos estruturais, enquanto que menor for os valores, temos uma diminuição da densidade do efeito estrutural.

Através da Figura 4.40 conseguimos observar que a apara do furo NT2-B1-C5 é a que tem maior encruamento dos ensaios analisados, enquanto que a apara NT2-B2-S1 é a que apresenta maior deformação por elevação de temperatura, ou seja menor encruamento. É possível reparar também que de um modo geral as rectas que unem os pontos da FWHW ao longo da apara, têm uma tendência decrescente. Este facto possivelmente remete que no início da furação o material apresenta maior encruamento e ao longo do processo da furação devido ao efeito de temperatura o efeito de encruamento é atenuado, como é bem visível para o caso do NT2-B1-C5.

Comparando as aparas NT2-B2-C1 e NT2-B2-S1, onde a única diferença é nas condições de maquinagem, criogenia e seco, percebe-se que ao maquinar com criogenia o efeito da elevação da temperatura não foi tão acentuado como no NT2-B2-S1. Analisando todas as aparas examinadas por DRX e comparando as condições de furação (seco, emulsão e criogenia), nota-se que o ensaio com menor encruamento é que foi realizado em condições a seco, o que era espectável termos maiores temperaturas na furação, o que confirma o que dito anteriormente.

Foi ainda comparado as respectivas forças axiais obtidas de cada ensaio e exceptuado o valor em falta de um ensaio todas as forças restantes indicam que quanto maior o encruamento é verificado, maior foi o valor da força axial obtida.

Tabela 4.13 Comparação dos ensaios com a força axial

Ensaio	Força Axial [N]	
NT2-B1-C5	1123	
NT2-B2-E5	-	
NT2-B2-C1	1017	
NT2-B2-E2	639	
NT2-B2-S1	467.7	

↑
Encruamento

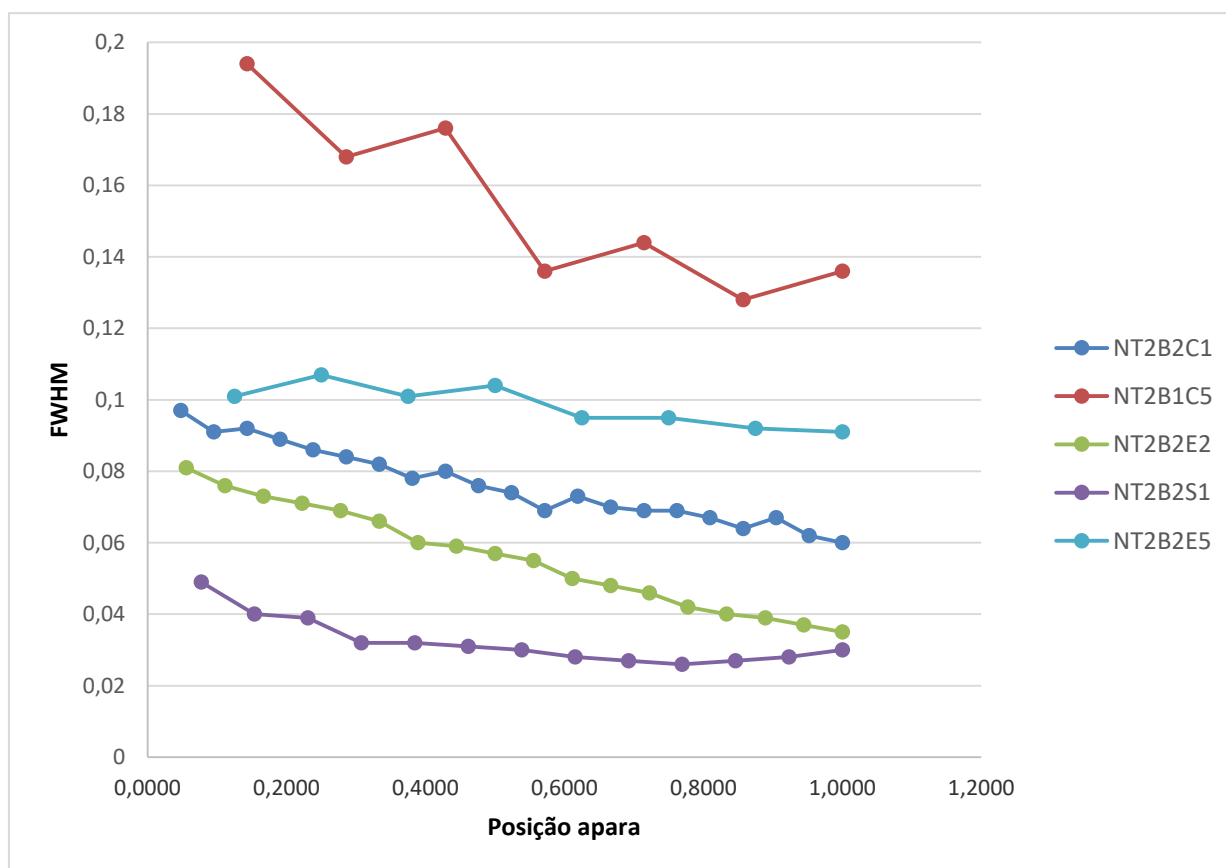


Figura 4.40 FWHM dos ensaios analisados por DRX

Para o estudo de DSC realizado nas aparas, foi estudado o início e o fim da apara de modo a perceber se houve alterações estruturais. Na Figura 4.41

Figura 4.41 Comparação da apara NT3-B2-C1 com o material base NiTi-3 estão representados três ensaios de DSC, início da apara (I) corresponde à linha de cor verde, o fim da apara (F) à vermelha e por último a preto corresponde ao material base (MB). Através desta figura comparativa conseguimos perceber se ao longo da apara, houve alterações estruturais no material. Da análise feita aos DSC obtidos, conseguimos observar que a apara está austenítica à temperatura ambiente, no entanto houve alterações da estrutura do material quando se estava a maquinar. A alteração é perceptível quando observamos que no início da apara a linha está mais achada do que no fim da apara, o que faz com que haja um efeito decrescente do encruamento ao longo da apara.

No Anexo E encontram-se a comparação dos ensaios obtidos por DSC e o respectivo material base.

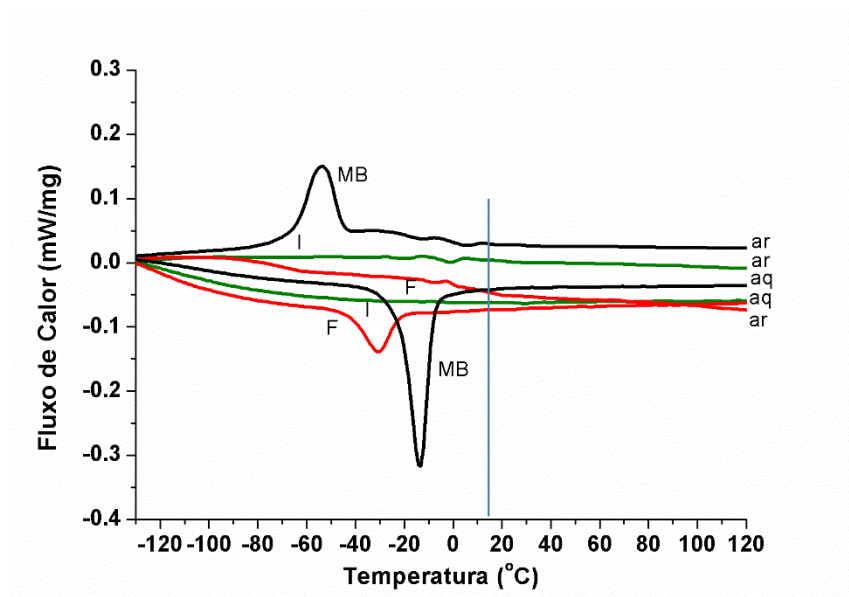


Figura 4.41 Comparação da apara NT3-B2-C1 com o material base NiTi-3

Na Figura 4.42 estão representadas os DSC realizados no início das aparas apenas na fase de aquecimento. Com esta comparação de linhas, conseguimos perceber quais os inícios de aparas que estão mais encruadas. Observando na figura os DSC correspondente aos ensaios NT2-B2-C1, NT2-B2-E2 e NT2-B2-S1 e comparando-os com a análise obtida por DRX na Figura 4.40 dos mesmos ensaios, percebemos a informação está em conformidade com aquilo que foi dito. De forma análogo, a Figura 4.43 representa o fim das aparas no aquecimento.

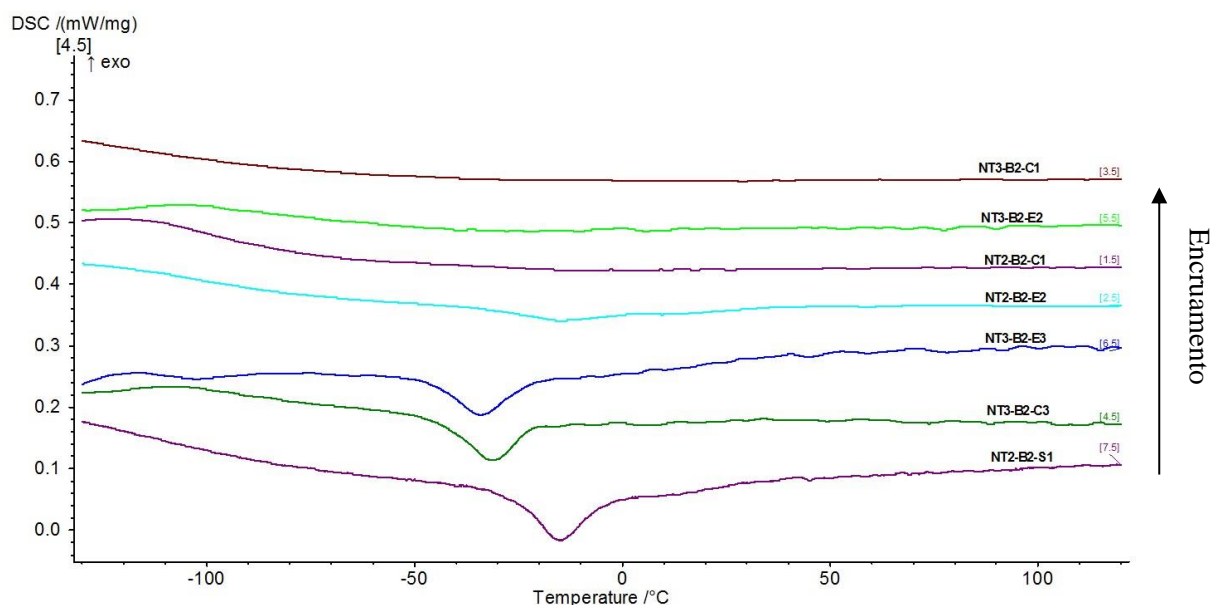


Figura 4.42 DSC do início das aparas no aquecimento

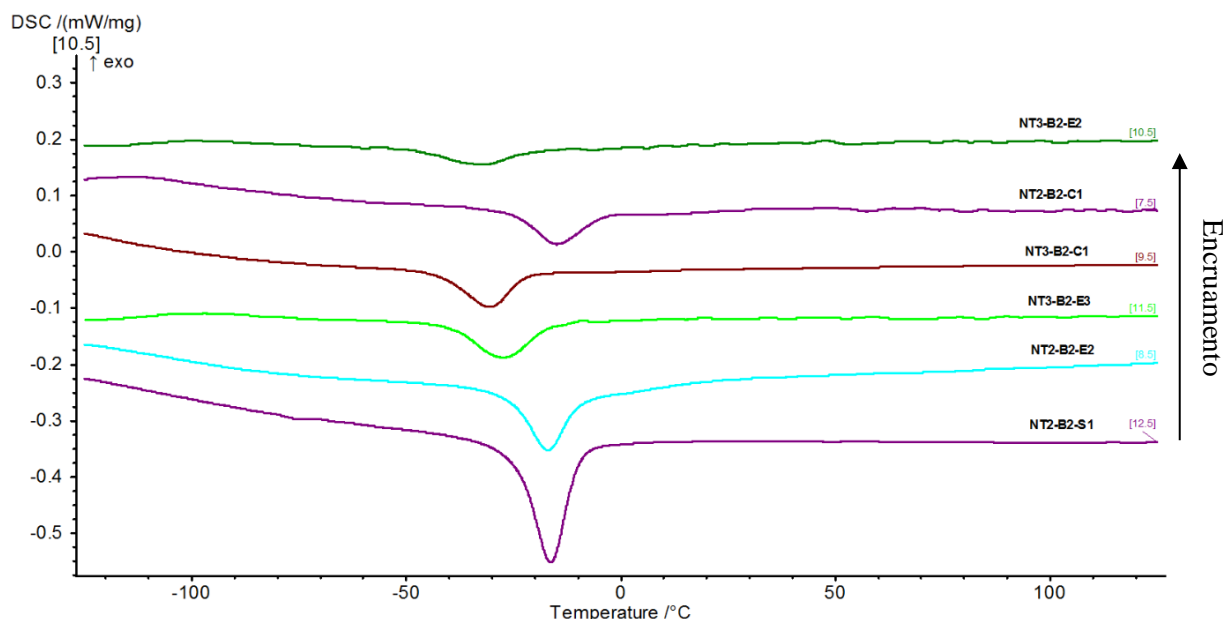


Figura 4.43 DSC do fim das aparas no aquecimento

Dos vários ensaios obtidos por DSC foi feita uma comparação entre alguns ensaios que podem ser comparáveis, onde existe apenas uma variante de condição de maquinagem. As várias comparações feitas são referentes ao início da apara obtida e as linhas a cor azul e vermelho correspondem ao arrefecimento e aquecimento respectivamente, dos ensaios de DSC. Para efeitos de comparação são analisadas as linhas de aquecimento.

A Figura 4.44 é a comparação de dois ensaios, NT2-B2-C1 com NT3-B2-C1, onde a diferença entre eles é o material base que foi furado. Através da leitura da imagem retiramos que o material de uma liga com maior percentagem atômica de Níquel (NT3-B2-C1), no início de furação, tem um maior encruamento, ou seja, um aumento de densidade de efeitos estruturais.

A Figura 4.45 é a comparação de dois ensaios, NT3-B2-C1 com NT3-B2-C3, onde a diferença entre eles é a velocidade de corte. O aumento da velocidade de corte de 16.00 *m/min* do ensaio NT3-B2-C1 para 69.00 *m/min* do ensaio NT3-B2-C3 fez com que houvesse um efeito de aumento de temperatura no processo, diminuindo assim a densidade de defeitos estruturais.

A Figura 4.46 é a comparação de dois ensaios, NT3-B2-E3 com NT3-B2-C3, onde a diferença entre eles é a ambiente de furação, criogenia e emulsão. Através da leitura da imagem retiramos que o material da apara do ensaio realizado a emulsão tem maior encruamento comparado com o ensaio realizado por criogenia.

A Figura 4.47 é a comparação de dois ensaios, NT2-B2-S1 com NT2-B2-C1, onde a diferença entre eles é o ambiente de furação, criogenia e seco. Reparamos que ambos os casos o

processo de deformação por arranque de apra se inicia com uma elevada temperatura, mas é mais notória no processo de furação a seco como seria de esperar.

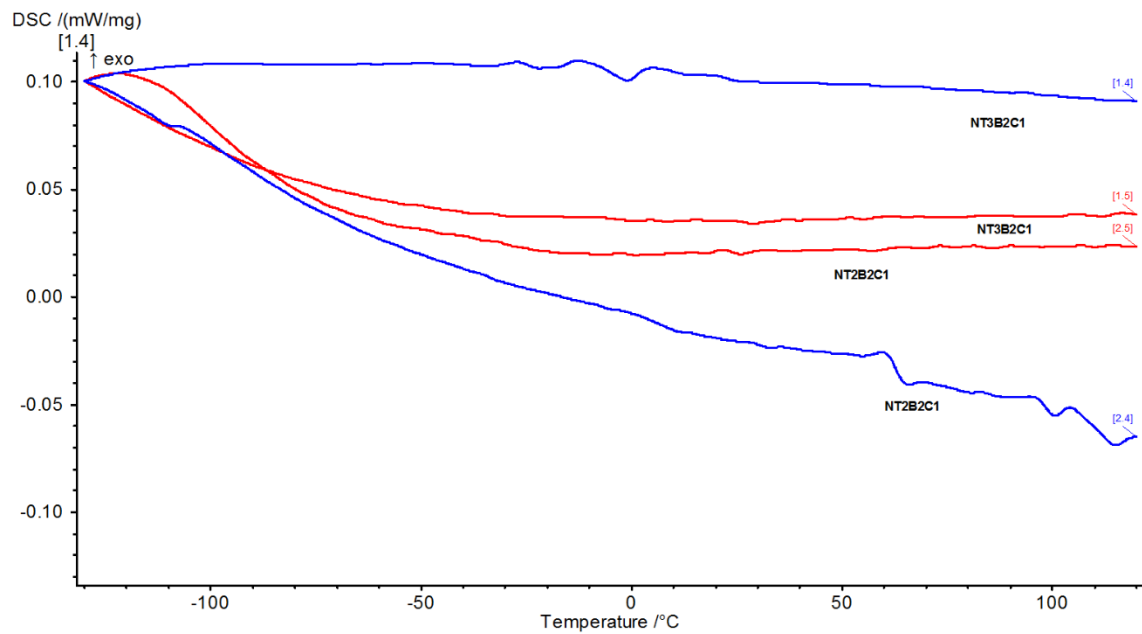


Figura 4.44 Comparação por DSC do início do furo dos ensaios NT3-B2-C1 com NT2-B2-C1

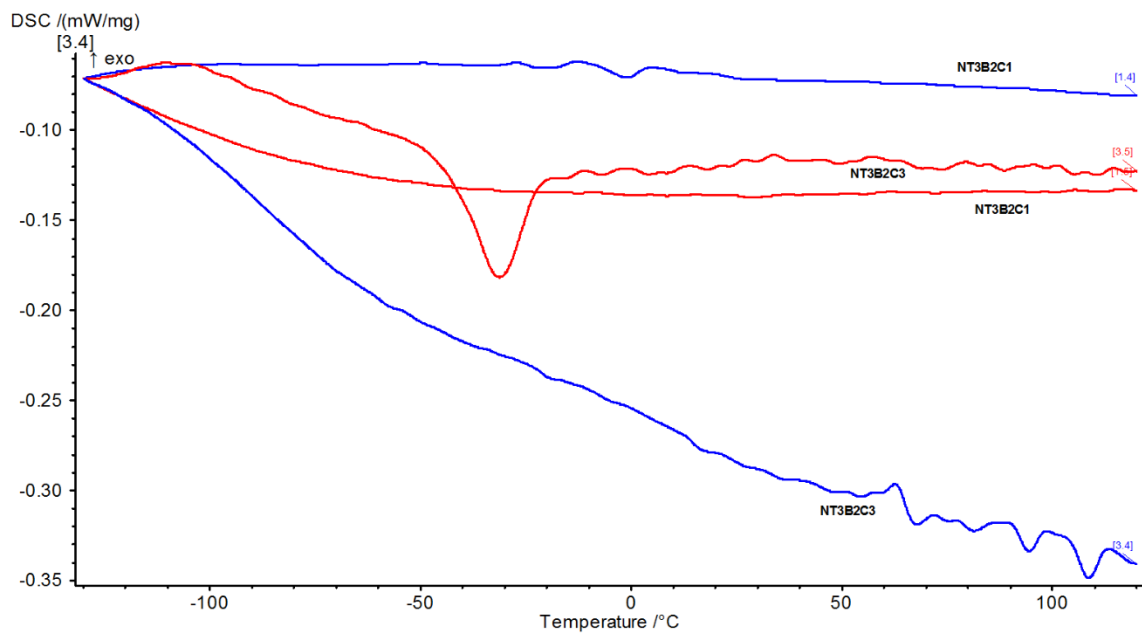


Figura 4.45 Comparação por DSC do início do furo dos ensaios NT3-B2-C1 com NT3-B2-C3

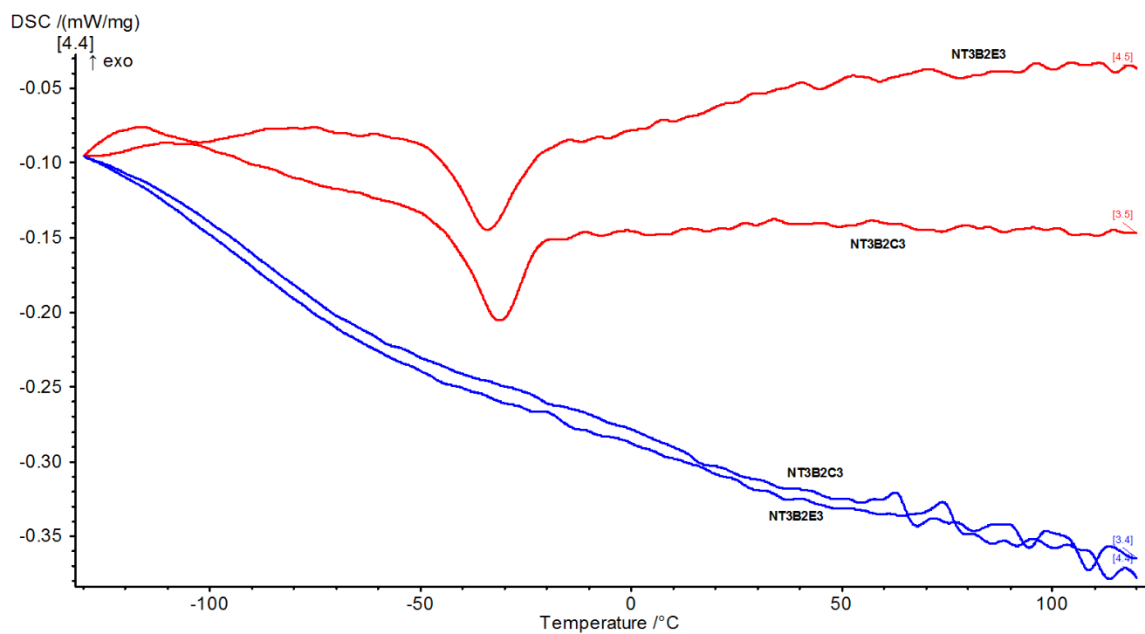


Figura 4.46 Comparação por DSC do início do furo dos ensaios NT3-B2-E3 com NT3-B2-C3

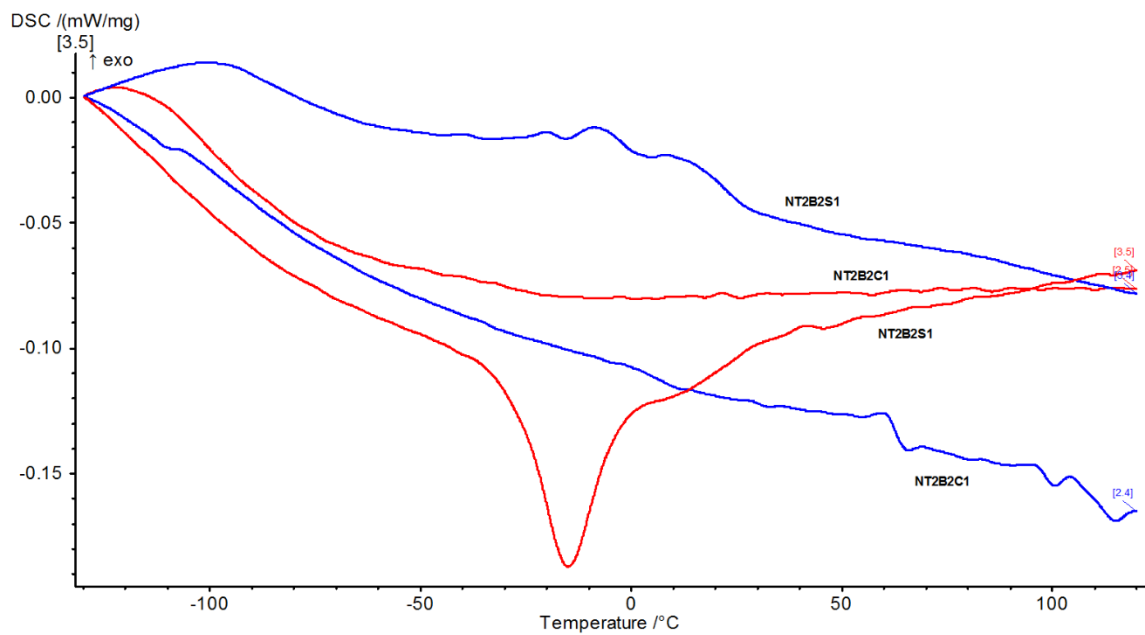


Figura 4.47 Comparação por DSC do início do furo dos ensaios NT2-B2-S1 com NT2-B2-C1

A Tabela 4.14, que representa a temperatura do pico de transformação no aquecimento (linha vermelho) e a respectiva área do pico, complementa a informação sobre os ensaios realizados no DSC anteriores e também fundamenta a comparação feita entre alguns ensaios. Para o caso dos ensaios NT3-B2-C1 e NT2-B2-C1 não foi possível identificar a temperatura e área do pico.

Tabela 4.14 Temperatura e área do pico de transformação dos ensaios DSC

Ensaio	Temperatura do pico (°C)	Área do pico (J/g)
NT3-B2-C1	-	-
NT2-B2-C1	-	-
NT3-B2-C3	-31.3	5.705
NT3-B2-E3	-34.2	5.767
NT2-B2-S1	-15.0	9.002

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

O estudo conduzido nesta dissertação teve como principal objectivo a caracterização do processo de furação das ligas NiTi. Foi realizada a análise dos mecanismos físicos e parâmetros processuais do processo de furação na liga NiTi com memória de forma e das alterações estruturais do material induzidas pelo processo. Este estudo foi efectuado tendo em conta os seguintes critérios:

- Evolução da força axial e binário
- Avaliação da geometria do furo e desvios geométricos

Com o intuito de cumprir o objectivo traçado, foram realizados ensaios de furação com diferentes parâmetros e condições de maquinagem e posteriormente os resultados obtidos nos ensaios foram analisados com as curvas de superfície de resposta obtidas pelo desenho de experiências. Foram também realizados estudos nas aparas obtidas após a furação.

No que diz respeito aos resultados experimentais a sua análise foi realizada no capítulo anterior. Assim, neste ponto serão referidas apenas as principais conclusões, sendo essas:

- Na furação da liga NiTi, com os parâmetros e condições utilizadas, as brocas de aço rápido cobalto não se mostraram adequadas. Verificou-se que as brocas de metal duro são eficientes na concretização de furos em ligas NiTi.
- A aplicação da metodologia de superfície de resposta conduziu a modelos com baixa adequação e sem evidência de quais os factores considerados mais influentes. Consequentemente, os modelos obtidos são pouco conclusivos do ponto de vista quantitativo. No entanto, as tendências das variáveis nas superfícies de resposta poderão ser consideradas, dado se afigurarem fisicamente coerentes.
- Em termos gerais, a força axial e o binário tendem a apresentar valores inferiores quando se utilizam valores altos de velocidade de corte e valores baixos de avanço.

- Nas condições de criogenia, a força axial apresenta valores mais baixos na maquinagem do material NiTi-3 (51.0 at. % Ni) e valores mais elevados para material NiTi-2 (50.8 at. % Ni).
- No que diz respeito à geometria dos furos, na maquinagem por emulsão a ovalização é menor quando se utilizam valores médios quer de velocidade de corte ($v = 42.5$ m/min) quer de avanço ($f = 0.08$ mm/rot).
- Na criogenia a ovalização dos furos é menor quando se utilizam valores altos do factor velocidade de corte ($v = 80$ m/min). O factor avanço não exerce uma influência significativa sobre esta variável quando se utiliza este valor de velocidade de corte.
- No domínio das variáveis considerado pelo DoE e após a aplicação da metodologia de superfície de resposta, verificou-se que a combinação de parâmetros de corte que conduz a melhores resultados na furação de ligas de NiTi corresponde a uma velocidade de corte de 80 m/min (ponto extremo superior) e um avanço de 0.08 mm/rot (nível 0).
- Nos ensaios por DRX e DSC verificou-se que no arranque da apara, o início da apara apresentava maior encruamento e que na fase final a deformação é devida ao aumento de temperatura que recristaliza o material reduzindo um pouco a deformação induzida.
- Nos casos analisados, verificou-se que quanto maior a força axial, maior o encruamento apresentado na apara.
- Apesar da pouca diferença, o material que apresentou melhores resultados foi a liga NiTi-3.
- A maquinagem com condições criogénicas é a que apresenta melhores resultados em comparação com condições a seco e emulsão.

5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a investigação apresentada neste trabalho alguns aspectos foram identificados que poderiam melhorar a qualidade dos resultados. A partir dessas observações, sugere-se como trabalho futuro a abordagem dos seguintes aspectos:

- ⇒ A realização de um maior número de ensaios para cada quantidade e geometria de dano, para verificação da repetibilidade;
- ⇒ Estudo da qualidade superficial do furo;
- ⇒ Estudo da geometria de ferramenta de corte para furação de NiTi;
- ⇒ Realização de testes de dureza no material depois de furado;
- ⇒ Análise por SEM às brocas usadas para se perceber o seu desgaste;
- ⇒ Este estudo foi realizado em ligas de NiTi na fase austenítica à temperatura ambiente, mas teria igualmente interesse o estudo na fase martensítica (mais dúctil) à temperatura ambiente para se poder comparar os diferentes comportamentos da liga quando maquinada;

Referências Bibliográficas

- [1] K. Otsuka and C. M. Wayman, *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press, 1999.
- [2] T. Duerig, A. Pelton, and D. Stöckel, “An overview of nitinol medical applications,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 273–275, pp. 149–160, Dec. 1999.
- [3] J. Frenzel, Z. Zhang, K. Neuking, and G. Eggeler, “High quality vacuum induction melting of small quantities of NiTi shape memory alloys in graphite crucibles,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 385, no. 1–2, pp. 214–223, Dec. 2004.
- [4] A. P. Markopoulos, I. S. Pressas, and D. E. Manolakos, “7 - Manufacturing processes of shape memory alloys,” in *Materials Forming and Machining*, Woodhead Publishing, 2016, pp. 155–180.
- [5] F. Braz Fernandes, “Ligas com Memória de forma.” Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2003.
- [6] O. Prymak *et al.*, “Morphological characterization and in vitro biocompatibility of a porous nickel–titanium alloy,” *Biomaterials*, vol. 26, no. 29, pp. 5801–5807, Oct. 2005.
- [7] R. Pfeifer *et al.*, “Noninvasive induction implant heating: An approach for contactless altering of mechanical properties of shape memory implants,” *Medical Engineering & Physics*, vol. 35, no. 1, pp. 54–62, Jan. 2013.
- [8] K. Otsuka and X. Ren, “Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys,” *Progress in Materials Science*, vol. 50, no. 5, pp. 511–678, Jul. 2005.
- [9] W. Cai, X. L. Meng, and L. C. Zhao, “Recent development of TiNi-based shape memory alloys,” *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 9, no. 6, pp. 296–302, Dec. 2005.
- [10] M. S. Alam, M. A. Youssef, and M. Nehdi, “Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: a review,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 34, no. 9, pp. 1075–1086, Sep. 2007.
- [11] S. Nemat-Nasser and W.-G. Guo, “Superelastic and cyclic response of NiTi SMA at various strain rates and temperatures,” *Mechanics of Materials*, vol. 38, no. 5–6, pp. 463–474, May 2006.
- [12] A. P. Markopoulos, I. S. Pressas, and D. E. Manolakos, “Manufacturing processes of shape memory alloys,” in *Materials Forming and Machining*, Elsevier, 2016, pp. 155–180.
- [13] P. K. Kumar and D. C. Lagoudas, “Introduction to Shape Memory Alloys,” in *Shape Memory Alloys*, Springer US, 2008, pp. 1–51.
- [14] S. Shrivastava, *Medical Device Materials: Proceedings from the Materials & Processes for Medical Devices Conference 2003, 8-10 September 2003, Anaheim, California*. ASM International, 2004.
- [15] J. Ryhänen *et al.*, “Biocompatibility of nickel-titanium shape memory metal and its corrosion behavior in human cell cultures,” *J. Biomed. Mater. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 451–457, Jun. 1997.


- [16] E. Zanaboni, “One Way and Two Way–Shape Memory Effect: Thermo Mechanical Characterization of Ni–Ti wires,” Dissertação de Mestrado, Università degli Studi di Pavia, Pavia, 2007.
- [17] D. Stoeckel and T. Waram, “Use of Ni-Ti shape memory alloys for thermal sensor-actuators,” 1992, vol. 1543, pp. 382–387.
- [18] J. Mohd Jani, M. Leary, A. Subic, and M. A. Gibson, “A review of shape memory alloy research, applications and opportunities,” *Materials & Design*, vol. 56, pp. 1078–1113, Apr. 2014.
- [19] J. M. Sabater-Navarro, N. Garcia, D. Ramos, E. Camayo, and A. Vivas, “Hand neuro-rehabilitation system using Nitinol spring actuators,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 63, Part 1, pp. 50–56, Jan. 2015.
- [20] J. Teixeira, *Fundamentos Físicos do Corte dos Metais*, 04–2001st ed. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2001. ISBN: 9789725951002
- [21] A. Z. Sultan, S. Sharif, and D. Kurniawan, “Effect of Machining Parameters on Tool Wear and Hole Quality of AISI 316L Stainless Steel in Conventional Drilling,” *Procedia Manufacturing*, vol. 2, pp. 202–207, 2015.
- [22] J. P. Davim, “Estudo da Maquinabilidade dos Compósitos de Matriz de Alumínio,” Porto: Universidade do Porto, 1997. Tese de Doutoramento.
- [23] K. Weinert, V. Petzoldt, D. Kötter, and M. Buschka, “Drilling of NiTi Shape Memory Alloys,” *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, vol. 35, no. 5, pp. 338–341, May 2004.
- [24] H. C. Lin, K. M. Lin, and Y. C. Chen, “A study on the machining characteristics of TiNi shape memory alloys,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 105, no. 3, pp. 327–332, Sep. 2000.
- [25] M. C. Kong, D. Axinte, and W. Voice, “Challenges in using waterjet machining of NiTi shape memory alloys: An analysis of controlled-depth milling,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, no. 6, pp. 959–971, Jun. 2011.
- [26] Dormer, “Manual técnico.” 2015.
- [27] M. Biček, F. Dumont, C. Courbon, F. Pušavec, J. Rech, and J. Kopač, “Cryogenic machining as an alternative turning process of normalized and hardened AISI 52100 bearing steel,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 12, pp. 2609–2618, Dec. 2012.
- [28] GALP, “GALP Solcut - Ficha técnica.” 2016.
- [29] Y. Kaynak, S. . Robertson, H. . Karaca, and I. . Jawahir, “Progressive tool-wear in machining of room-temperature Austenitic NiTi Alloys: The influence of cooling/lubricating, melting, and heat treatment conditions,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 215, pp. 94–104, Jan. 2015.
- [30] Z. L. Pereira and J. G. Requeijo, *Qualidade - Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*, 2º Edição. Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012. ISBN: 9789898022653
- [31] J. A. Cornell, *How to Apply Response Surface Methodology*. American Society for Quality Control, 1984.
- [32] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 2008.
- [33] C. Machado, “Modelos estatísticos para a caracterização de texturas produzidas por electroerosão,” Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2002. Tese de Doutoramento.

- [34] “Central Composite Designs (CCD),” *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods*, Apr-2012. .
- [35] J. P. Sibilio, *A Guide to Materials Characterization and Chemical Analysis*. John Wiley & Sons, 1996.
- [36] G. W. H. Höhne, W. F. Hemminger, and H.-J. Flammersheim, *Differential Scanning Calorimetry*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003.

Resultados da furação nos provetes

Anexo A Tabela 1 Resultado da maquinagem do provete P1

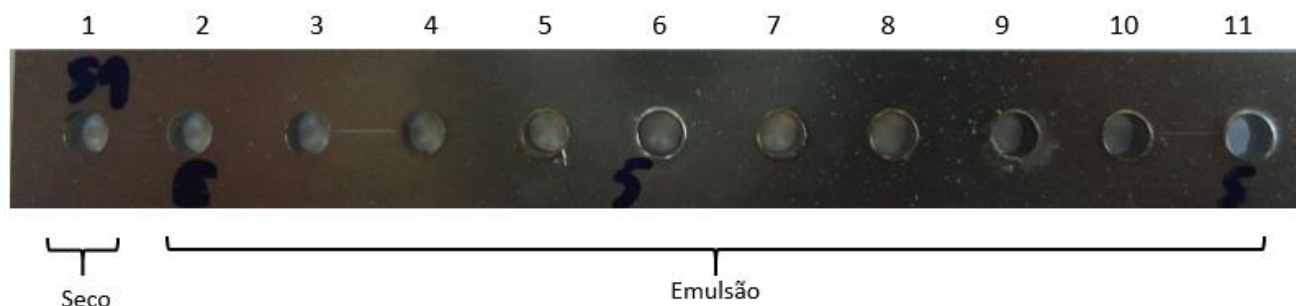
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----



	Seco					Emulsão				
--	------	--	--	--	--	---------	--	--	--	--

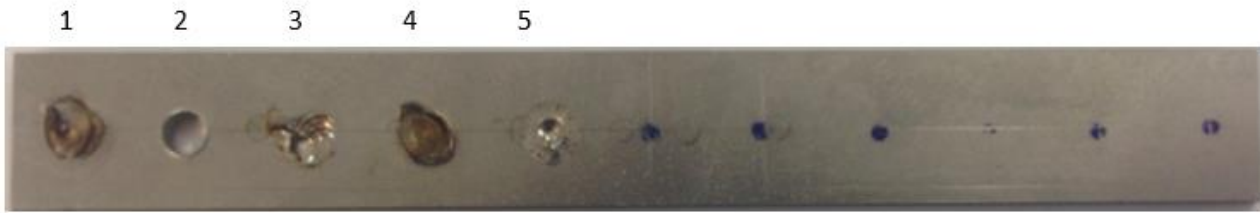
#	Designação do furo	Parâmetros		Broca	Furo	Força Axial max. [N]	Binário max. [Nm]
		v [m/min]	f [mm/rot]				
1	NT2-B1-S1	42.50	0.08	Fundiu a ponta da broca	Sem êxito	-	-
2	NT2-B1-E1	16.00	0.06	Fundiu a ponta da broca	Sem êxito	-	-
3	NT2-B1-E2	16.00	0.09	Fundiu a ponta da broca	Sem êxito	-	-
4	NT2-B1-E3	69.00	0.06	Fundiu a ponta da broca	Sem êxito	-	-
5	NT2-B1-E4	69.00	0.09	Partiu a broca	Sem êxito	-	-
6	NT2-B1-E5	5.00	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	912.03	0.69
7	NT2-B1-E6	80.00	0.08	Fundiu a ponta da broca	Sem êxito	-	-
8	NT2-B1-E7	42.50	0.05	Fundiu a ponta da broca	Sem êxito	-	-
9	NT2-B1-E8	42.50	0.1	Fundiu a ponta da broca	Sem êxito	-	-
10	NT2-B1-E9	42.50	0.08	Fundiu a ponta da broca	Sem êxito	-	-

Anexo A Tabela 2 Resultado da maquinagem do provete P2



#	Designação do furo	Parâmetros		Broca	Furo	Força max. [N]	Binário max. [Nm]
		v [m/min]	f [mm/rot]				
1	NT2-B2-S1	16.00	0.06	Desgaste da broca	Com êxito	467.77	0.57
2	NT2-B2-E1	16.00	0.06	Desgaste da broca	Com êxito	465.22	0.64
3	NT2-B2-E2	16.00	0.09	Desgaste da broca	Com êxito	639.12	0.81
4	NT2-B2-E3	69.00	0.06	Desgaste da broca	Com êxito	404.83	0.52
5	NT2-B2-E4	69.00	0.09	Desgaste da broca	Com êxito	575.40	0.71
6	NT2-B2-E5	5.00	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	-	-
7	NT2-B2-E6	80.00	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	-	-
8	NT2-B2-E7	42.50	0.05	Desgaste da broca	Com êxito	-	-
9	NT2-B2-E8	42.50	0.1	Desgaste da broca	Com êxito	-	-
10	NT2-B2-E9	42.50	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	-	-
11	NT2-B2-E5	5.00	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	-	-

Anexo A Tabela 3 Resultado da maquinagem do provete P3



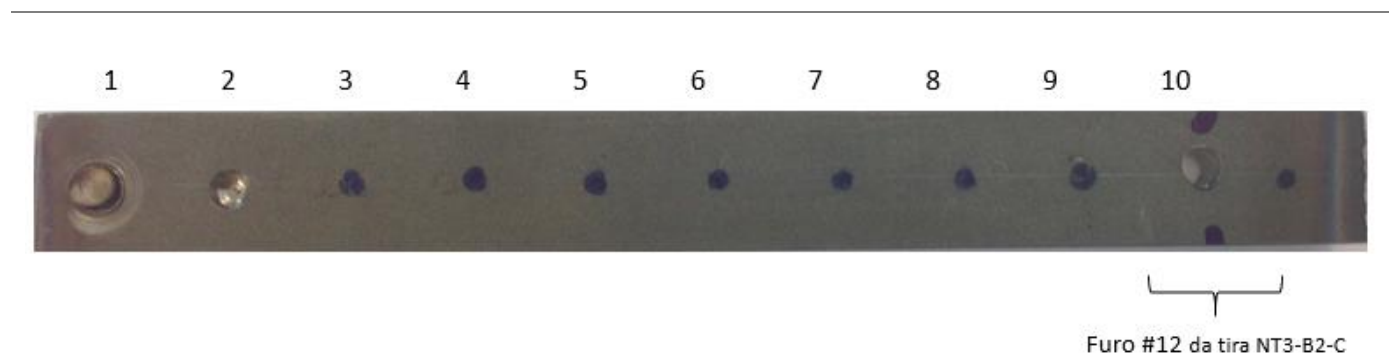
#	Designação do furo	Parâmetros		Broca	Furo	Força max. [N]	Binário max. [Nm]
		v [m/min]	f [mm/rot]				
1	NT2-B1-C1	16.00	0.06	Partiu a broca	Sem êxito	-	-
2	NT2-B1-C5	5.00	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	1123.00	1.07
3	NT2-B1-C6	80.00	0.08	Partiu a broca	Sem êxito	-	-
4	NT2-B1-C2	16.00	0.09	Fundiu a ponta da broca	Sem êxito	-	-
5	NT2-B1-C3	69.00	0.06	Partiu a broca	Sem êxito	-	-

Anexo A Tabela 4 Resultado da maquinagem do provete P4



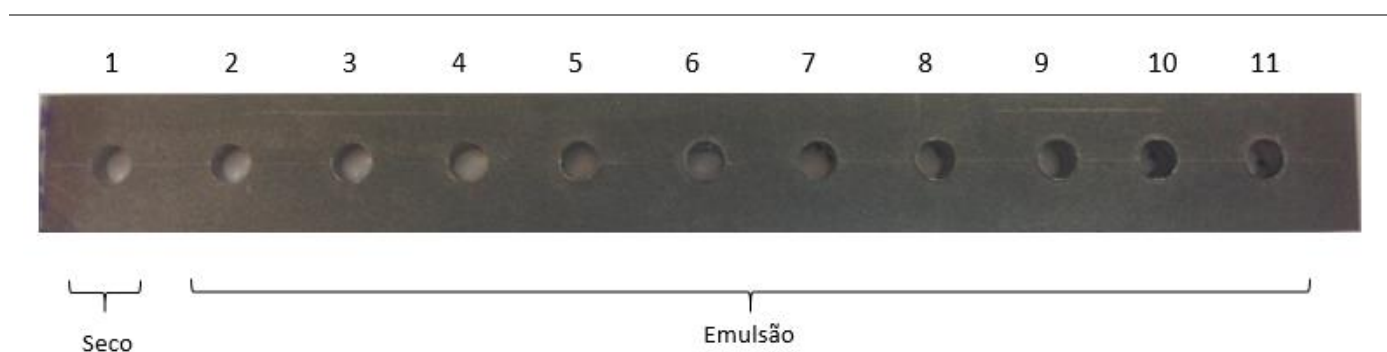
#	Designação do furo	Parâmetros		Broca	Furo	Força Axial max. [N]	Binário max. [Nm]
		v [m/min]	f [mm/rot]				
1	NT2-B2-C1	16.00	0.06	Desgaste da broca	Com êxito	1017	0.49
2	NT2-B2-C2	16.00	0.09	Desgaste da broca	Com êxito	-	-
3	NT2-B2-C3	69.00	0.06	Desgaste da broca	Com êxito	419.83	0.54
4	NT2-B2-C4	69.00	0.09	Desgaste da broca	Com êxito	595.44	0.69
5	NT2-B2-C5	5.00	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	854.00	1.46
6	NT2-B2-C6	80.00	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	384.37	0.56
7	NT2-B2-C7	42.50	0.05	Desgaste da broca	Com êxito	607.42	0.93
8	NT2-B2-C8	42.50	0.1	Desgaste da broca	Com êxito	808.42	1.07
9	NT2-B2-C9	42.50	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	803.75	0.90
10	NT2-B2-C2	16.00	0.09	Desgaste da broca	Com êxito	1140.4	1.32

Anexo A Tabela 5 Resultado da maquinagem do provete P5



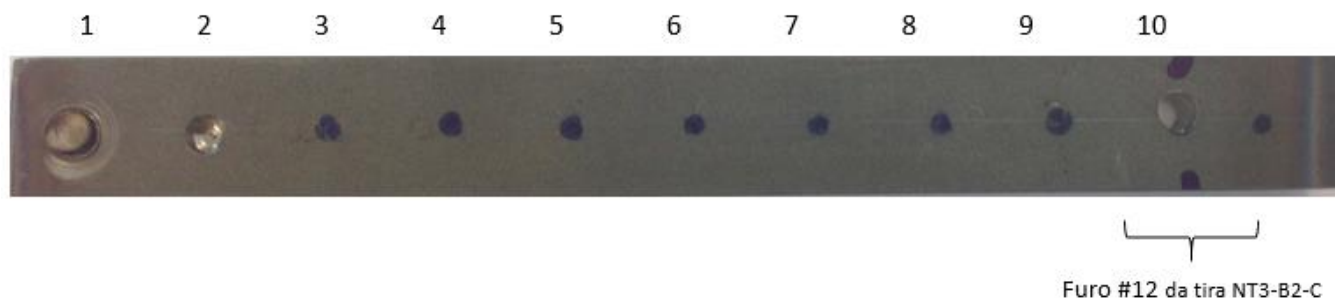
#	Designação do furo	Parâmetros		Broca	Furo	Força max. [N]	Binário max. [Nm]
		v [m/min]	f [mm/rot]				
1	NT3-B1-C1	16.00	0.06	Fundiu a ponta da broca	Sem êxito	-	-
2	NT3-B1-C5	5.00	0.08	Furou, mas depois partiu a broca	Sem êxito	-	-

Anexo A Tabela 6 Resultado da maquinagem do provete P6



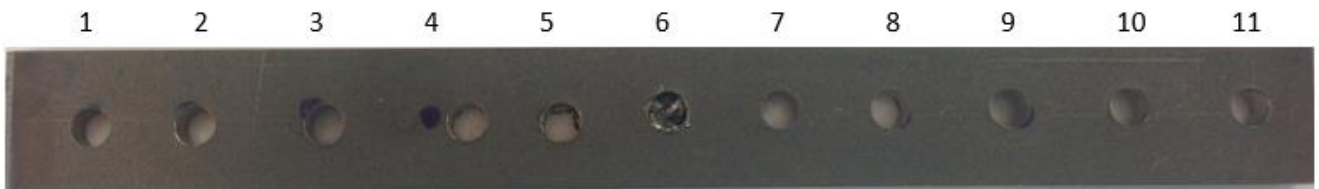
#	Designação do furo	Parâmetros		Broca	Furo	Força max. [N]	Binário max. [Nm]
		v	f				
		[m/min]	[mm/rot]				
1	NT3-B2-S1	42.50	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	437.04	0.69
2	NT3-B2-E1	16.00	0.06	Desgaste da broca	Com êxito	383.07	0.92
3	NT3-B2-E2	16.00	0.09	Desgaste da broca	Com êxito	577.11	1.37
4	NT3-B2-E3	69.00	0.06	Desgaste da broca	Com êxito	364.01	0.87
5	NT3-B2-E4	69.00	0.09	Desgaste da broca	Com êxito	487.84	1.16
6	NT3-B2-E5	5.00	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	899.65	2.03
7	NT3-B2-E6	80.00	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	570.26	0.90
8	NT3-B2-E7	42.50	0.05	Desgaste da broca	Com êxito	586.75	1.03
9	NT3-B2-E8	42.50	0.10	Desgaste da broca	Com êxito	799.16	1.34
10	NT3-B2-E9	42.50	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	715.32	1.28
11	NT3-B2-E10	42.50	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	723.89	1.12

Anexo A Tabela 7 Resultado da maquinagem do provete P7



#	Designação do furo	Parâmetros		Broca	Furo	Força max. [N]	Binário max. [Nm]
		v	f				
		[m/min]	[mm/rot]				
1	NT3-B1-C1	16.00	0.06	Fundiu a ponta da broca	Sem êxito	-	-
2	NT3-B1-C5	5.00	0.08	Furou, mas depois partiu a broca	Sem êxito	-	-

Anexo A Tabela 8 Resultado da maquinagem do provete P8



#	Designação do furo	Parâmetros		Broca	Furo	Força max. [N]	Binário max. [Nm]
		v [m/min]	f [mm/rot]				
1	NT3-B2-C1	16.00	0.06	Desgaste da broca	Com êxito	444.72	0.95
2	NT3-B2-C2	16.00	0.09	Desgaste da broca	Com êxito	635.97	1.21
3	NT3-B2-C2	16.00	0.09	Desgaste da broca	Com êxito	421.71	0.80
4	NT3-B2-C3	69.00	0.06	Desgaste da broca	Com êxito	705.13	1.29
5	NT3-B2-C4	69.00	0.09	Desgaste da broca	Com êxito	545.35	1.02
6	NT3-B2-C5	5.00	0.08	Desgaste da broca	Sem êxito	-	-
7	NT3-B2-C5	5.00	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	598.80	1.02
8	NT3-B2-C6	80.00	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	-	-
9	NT3-B2-C7	42.50	0.05	Desgaste da broca	Com êxito	458.12	0.71
10	NT3-B2-C8	42.50	0.10	Desgaste da broca	Com êxito	646.68	1.18
11	NT3-B2-C9	42.50	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	540.95	0.92
12	NT3-B2-C6	80.00	0.08	Desgaste da broca	Com êxito	485.78	0.71

Resultados do Matlab da geometria dos furos

Anexo B Tabela 1 Valores obtidos do provete P2

Ensaio	v (m/min)	f (mm/rot)	Ovalização	D _{max} (mm)	D _{min} (mm)
NT2-B2-E1	16.0	0.06	0.14	3.06	3.03
NT2-B2-E2	16.0	0.09	0.13	3.05	3.02
NT2-B2-E3	69.0	0.06	0.19	3.04	2.99
NT2-B2-E4	69.0	0.09	0.12	3.01	2.99
NT2-B2-E5	5.0	0.08	0.32	3.00	2.85
NT2-B2-E6	80.0	0.08	0.18	2.98	2.93
NT2-B2-E7	42.5	0.05	0.07	3.03	3.03
NT2-B2-E8	42.5	0.1	0.30	2.94	2.82
NT2-B2-E9	42.5	0.08	0.10	3.03	3.01
NT2-B2-E10	42.5	0.08	0.10	3.03	3.01

Anexo B Tabela 2 Valores obtidos do provete P4

Ensaio	v (m/min)	f (mm/rot)	Ovalização	D _{max} (mm)	D _{min} (mm)
NT2-B2-C1	16.0	0.06	0.34	3.03	2.85
NT2-B2-C2	16.0	0.09	0.22	3.06	2.99
NT2-B2-C3	69.0	0.06	0.15	3.04	3.00
NT2-B2-C4	69.0	0.09	0.25	3.06	2.96
NT2-B2-C5	5.0	0.08	0.26	3.00	2.90
NT2-B2-C6	80.0	0.08	0.10	2.94	2.93
NT2-B2-C7	42.5	0.05	0.29	3.04	2.91
NT2-B2-C8	42.5	0.1	0.22	2.94	2.87
NT2-B2-C9	42.5	0.08	0.28	3.07	2.95
NT2-B2-C10	42.5	0.08	0.28	3.07	2.95

Anexo B Tabela 3 Valores obtidos do provete P6

Ensaio	v (m/min)	f (mm/rot)	Ovalização	D_{max} (mm)	D_{min} (mm)
NT3-B2-E1	16.0	0.06	0.23	3.06	2.98
NT3-B2-E2	16.0	0.09	0.20	3.07	3.00
NT3-B2-E3	69.0	0.06	0.36	2.90	2.71
NT3-B2-E4	69.0	0.09	0.25	3.02	2.92
NT3-B2-E5	5.0	0.08	0.26	2.97	2.87
NT3-B2-E6	80.0	0.08	0.40	2.97	2.72
NT3-B2-E7	42.5	0.05	0.21	3.00	2.93
NT3-B2-E8	42.5	0.1	0.30	2.98	2.84
NT3-B2-E9	42.5	0.08	0.05	2.95	2.95
NT3-B2-E10	42.5	0.08	0.31	3.01	2.86

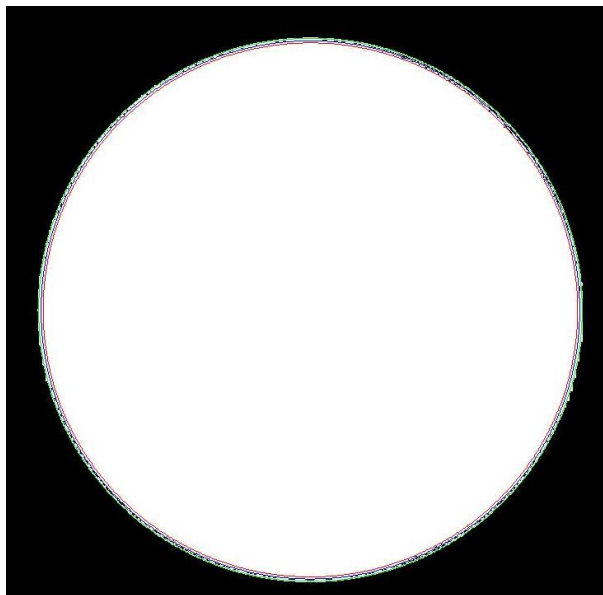
Anexo B Tabela 4 Valores obtidos do provete P8

Ensaio	v (m/min)	f (mm/rot)	Ovalização	D_{max} (mm)	D_{min} (mm)
NT3-B2-C1	16.0	0.06	0.44	2.98	2.67
NT3-B2-C2	16.0	0.09	0.33	3.02	2.85
NT3-B2-C3	69.0	0.06	0.31	2.98	2.83
NT3-B2-C4	69.0	0.09	0.36	2.95	2.76
NT3-B2-C5	5.0	0.08	0.32	3.04	2.88
NT3-B2-C6	80.0	0.08	0.17	3.01	2.97
NT3-B2-C7	42.5	0.05	0.31	3.00	2.85
NT3-B2-C8	42.5	0.1	0.24	3.04	2.95
NT3-B2-C9	42.5	0.08	0.42	2.99	2.72
NT3-B2-C10	42.5	0.08	0.42	2.99	2.72

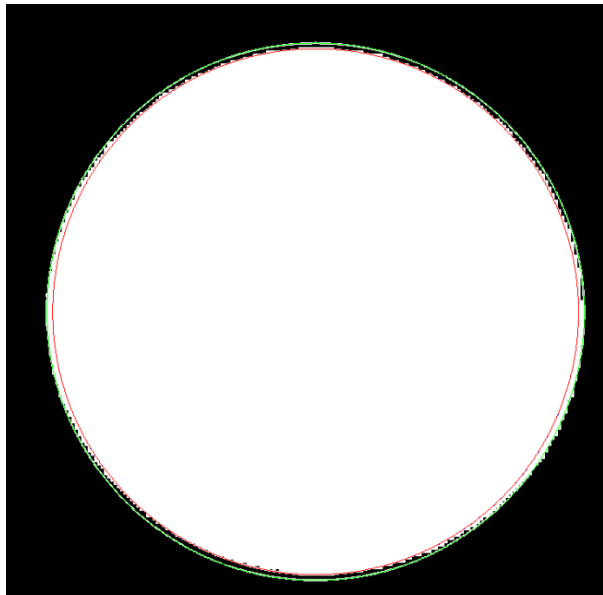
Imagens radiográfica de furos analisados no Matlab

Anexo C Tabela 1 Conjunto de imagens da ovalização analisadas no programa *Matlab*

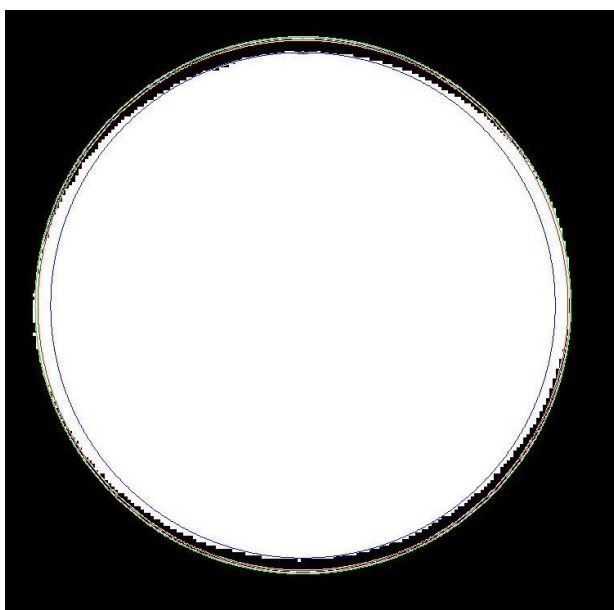
NT2-B2-E2 ($E_x=0.13$)



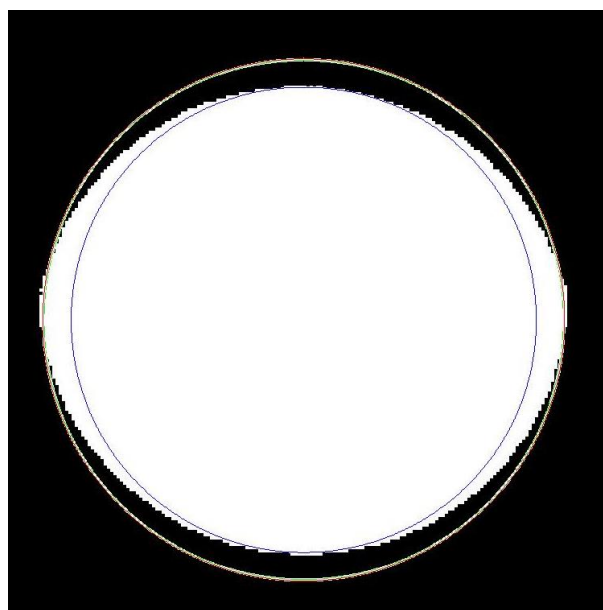
NT3-B2-E2 ($E_x=0.20$)



NT2-B2-C1 ($E_x=0.34$)



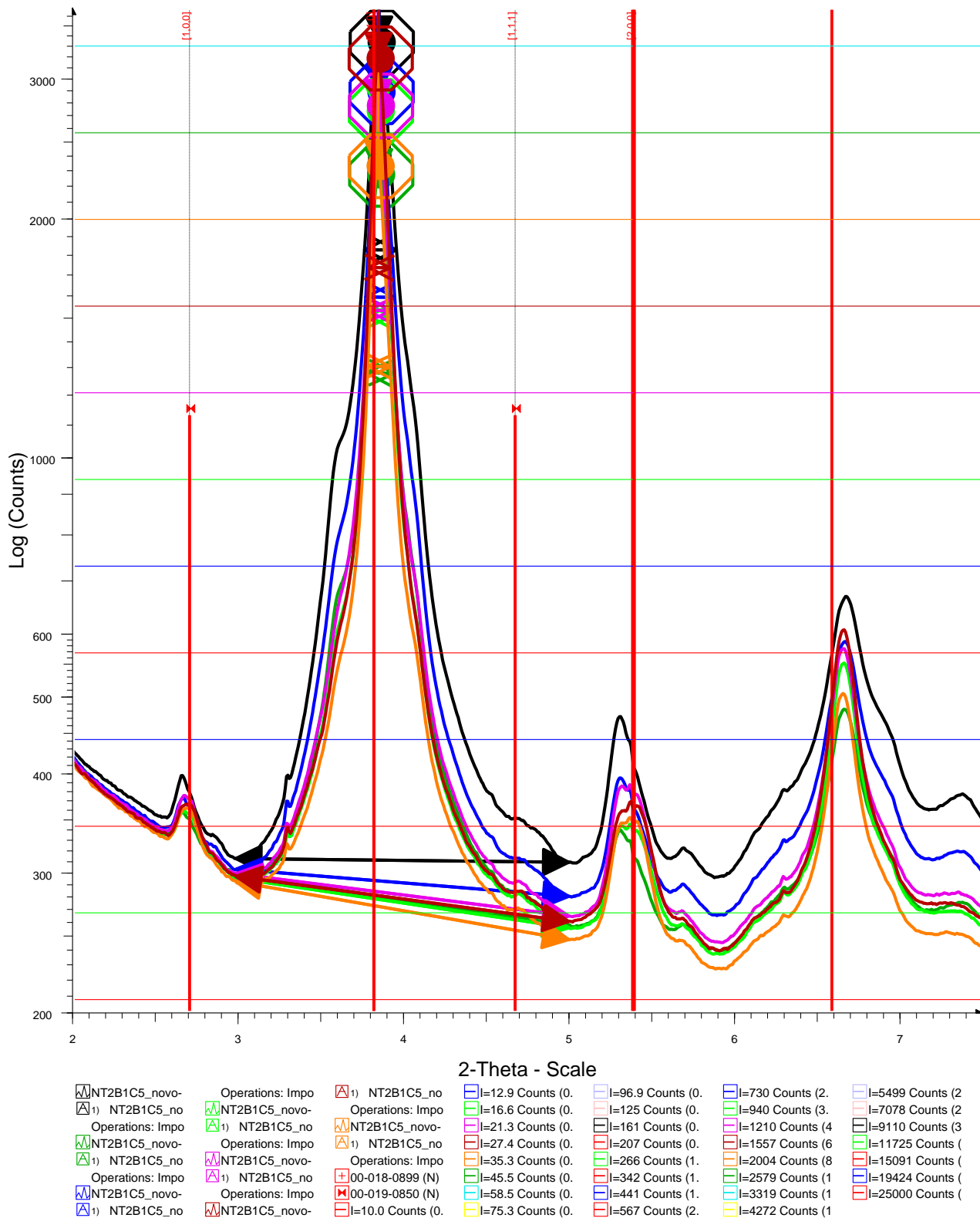
NT3-B2-C1 ($E_x=0.44$)



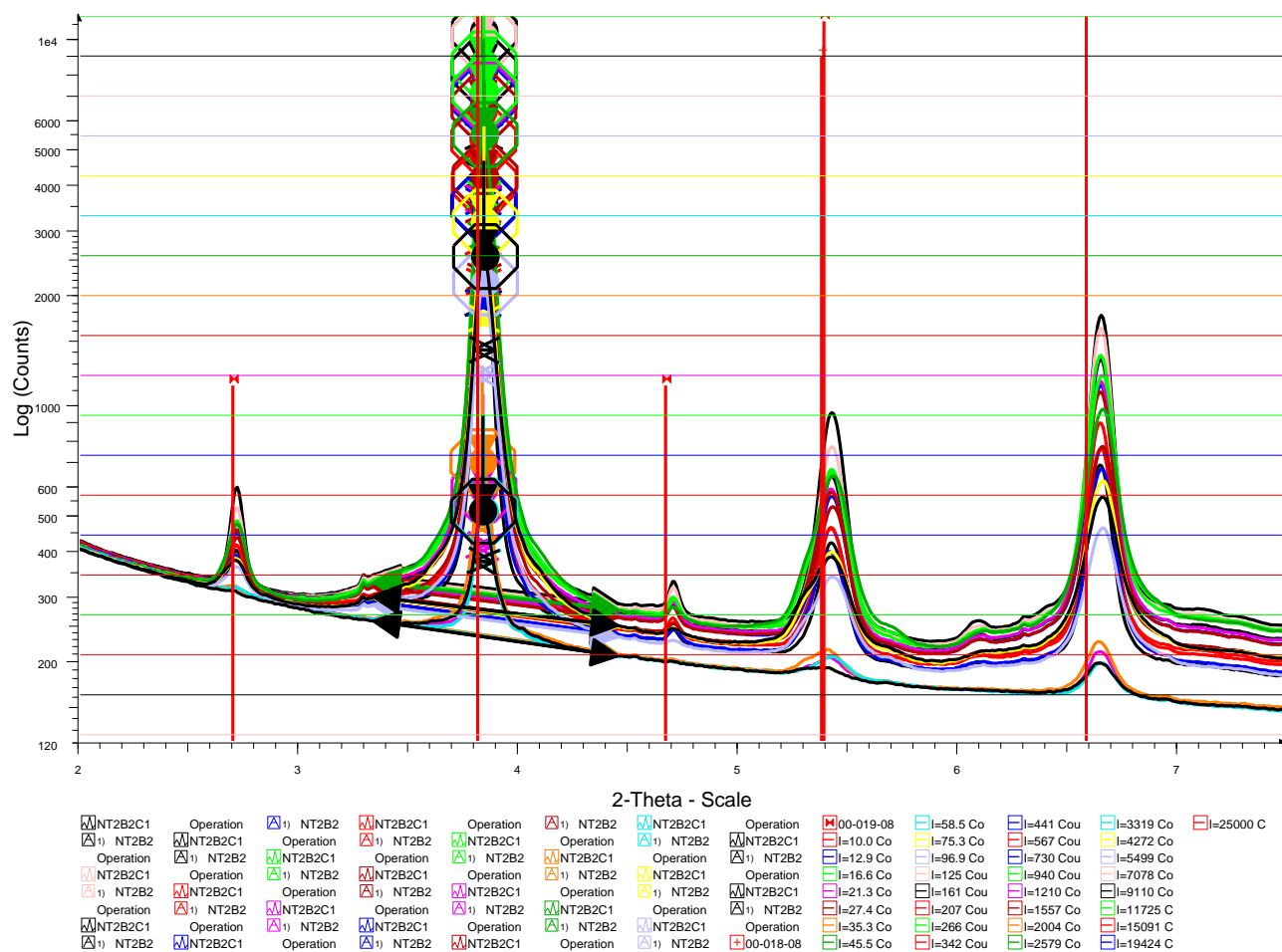
Legenda:

- Contorno verde – Diâmetro máximo
- Contorno azul – Diâmetro mínimo
- Contorno vermelho – Diâmetro nominal

Largura à meia altura dos ensaios DRX

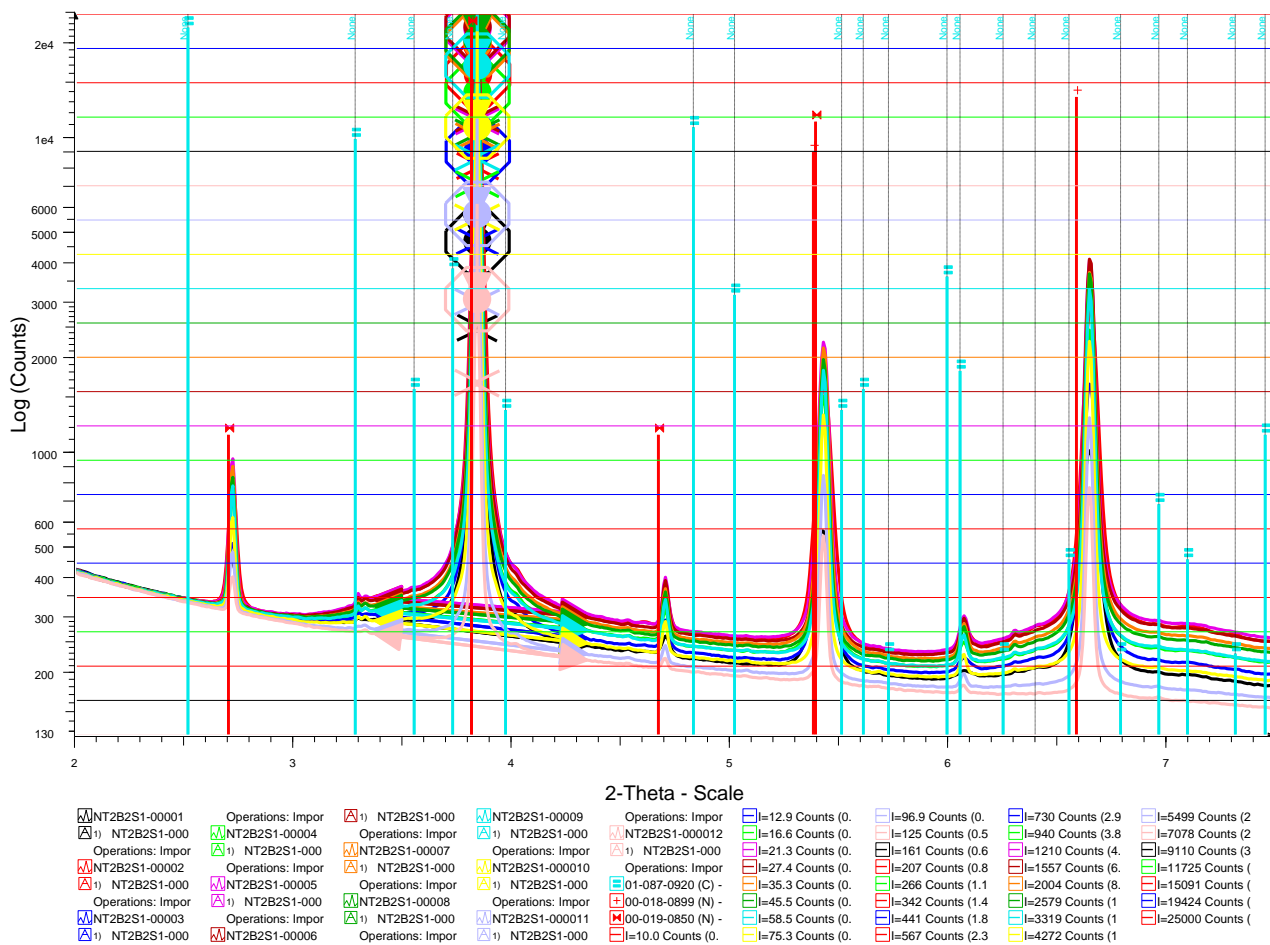


Anexo D Figura 1 Largura à meia altura do ensaio NT2-B1-C5



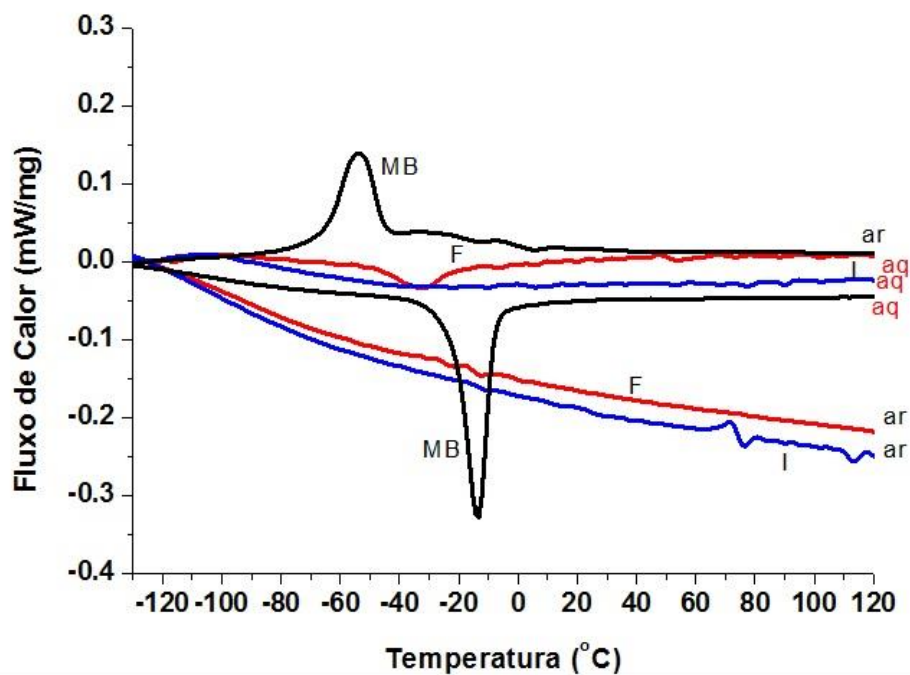
Anexo E Figura 2 Largura à meia altura do ensaio NT2-B2-C1



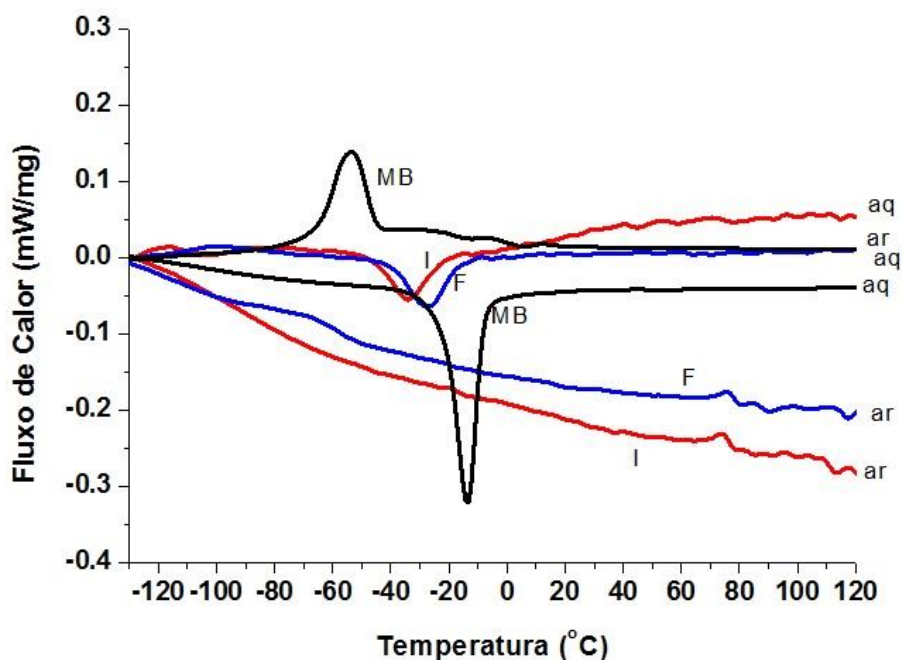


Anexo H Figura 5 Largura à meia altura do ensaio NT2-B2-S2

Comparação através do DSC do material base com a apara obtida



Anexo E Comparação do ensaio NT3-B2-E2 com material base NiTi-3



Anexo E Comparação do ensaio NT3-B2-E3 com o material base NiTi-3